

Universidad Nacional de Ingeniería
Facultad de Ingeniería Geológica Minera y Metalúrgica



TESIS

**Análisis del riesgo en la planificación minera, como visión
estratégica de la vida del activo**

Para obtener el título profesional de Ingeniero de Minas

Elaborado por

David Alonso Lozada Barrera

 [0009-0004-9643-7107](https://orcid.org/0009-0004-9643-7107)

Asesor

M.Sc. José Antonio Corimanya Mauricio

 [0000-0003-1078-4155](https://orcid.org/0000-0003-1078-4155)

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Lozada Barrera [1]
Referencia/Reference	[1] D. Lozada Barrera, “Análisis del riesgo en la planificación minera, como visión estratégica de la vida del activo” [Tesis de pregrado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Lozada, 2025)
Referencia/Reference	Lozada, D. (2025). <i>Análisis del riesgo en la planificación minera, como visión estratégica de la vida del activo</i> . [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

*Dedico este trabajo con todo mi cariño y gratitud a:
mi familia, por ser mi pilar inquebrantable, por su amor,
paciencia y sacrificio. Este logro también es suyo.*

*A mis padres, por enseñarme el valor del esfuerzo, la
constancia y la dedicación.*

Su ejemplo ha sido mi mayor inspiración.

*A mis maestros y mentores, quienes sembraron en mí el
conocimiento y la pasión por el aprendizaje.*

*A todos aquellos que sueñan con superarse, que enfrentan
desafíos con valentía y trabajan día a día por alcanzar sus metas.*

*Este trabajo representa el fruto del esfuerzo, la
perseverancia y la pasión por contribuir al desarrollo de la minería
con una visión estratégica y sostenible*

Agradecimientos

A lo largo de este camino de aprendizaje y crecimiento, han sido muchas las personas que han dejado su huella en mi formación y en la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a Dios, por darme la fortaleza, perseverancia y sabiduría para enfrentar cada desafío y culminar este trabajo.

A mi familia, por su amor incondicional, apoyo constante y paciencia en los momentos de mayor esfuerzo. Gracias por ser mi inspiración y mi motor en cada paso de este proceso.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos y enseñanzas, ayudándome a desarrollar una visión más amplia y crítica sobre la minería y la planificación estratégica.

A mis amigos y colegas, por su apoyo, palabras de aliento y compañía en este camino. Su motivación y confianza en mí fueron clave para mantenerme firme en los momentos difíciles.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, contribuyeron al desarrollo de esta investigación. A cada uno de ustedes, ¡gracias!

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo analizar el impacto de la gestión estratégica del riesgo en la planificación minera subterránea. Este enfoque busca optimizar el uso de recursos críticos, extender la vida útil del activo y generar oportunidades sostenibles a largo plazo. A través de la identificación de los factores clave de riesgo, se evaluaron metodologías avanzadas para integrar el análisis de riesgo en la toma de decisiones y en la viabilidad económica del proyecto.

El estudio se centra en el inventario mineral del VLOM 2025, compuesto por un 16 % de reservas, un 70 % de recursos inferidos con viabilidad económica y un 14 % de recursos con potencial económico, lo que refleja un nivel de riesgo geológico muy alto. Se identificó un incremento de 1.2 Mt respecto al plan LoA 2024, principalmente debido a la incorporación de recursos en la zona de C. Reemplazamiento y a la implementación del método SARC. Aunque el riesgo asociado no ha sido cuantificado de forma precisa, este crecimiento representa una ganancia directa en el inventario económico.

Además, se evaluaron riesgos operativos como la pérdida de concesiones y el aumento del flujo de agua en zonas profundas, que fueron mitigados con el diseño de infraestructura de bombeo en el Nivel 15. El 62 % del inventario mineral se encuentra por encima del cut-off económico de 136 USD/t, y el 93 % supera el costo operativo base de 99 USD/t, consolidando la rentabilidad del proyecto.

La evaluación económica concluyó que el Caso 8 (Fully Cost) es el escenario más favorable, con un Valor Presente Neto (VPN) de 48.25 millones de dólares. Se demuestra que la integración estratégica del riesgo no solo mejora la resiliencia del proyecto, sino que también maximiza su valor y promueve su sostenibilidad a largo plazo.

Palabras clave — Planificación minera, riesgo estratégico, análisis de riesgos, activo minero.

Abstract

This research aims to analyze the impact of strategic risk management in underground mine planning. This approach seeks to optimize the use of critical resources, extend the asset's life, and generate long-term sustainable opportunities. By identifying key risk factors, advanced methodologies were evaluated to integrate risk analysis into decision-making and the project's economic viability.

The study focuses on the mineral inventory of the VLOM 2025, which consists of 16% reserves, 70% inferred resources with economic viability, and 14% resources with economic potential, reflecting a very high level of geological risk. An increase of 1.2 Mt was identified compared to the LoA 2024 plan, mainly due to the incorporation of resources in the C. Reemplazamiento area and the implementation of the SARC mining method. Although the associated risk has not been precisely quantified, this growth represents a direct gain in the economic inventory.

Additionally, operational risks such as the expiration of concessions and the increase in water flow in deeper zones were evaluated and mitigated through the design of pumping infrastructure at Level 15. About 62% of the mineral inventory is above the economic cut-off grade of 136 USD/t, and 93% exceeds the base operating cost of 99 USD/t, strengthening the project's profitability.

The economic assessment concluded that Scenario 8 (Fully Cost) is the most favorable, presenting a Net Present Value (NPV) of 48.25 million USD. The results demonstrate that the strategic integration of risk not only improves the project's resilience but also maximizes its value and supports long-term sustainability.

Keywords — Mine planning, strategic risk, risk analysis, mining asset.

Tabla de Contenido

	Pág.
Resumen	v
Abstract	vi
Introducción	xiii
Capítulo I. Parte introductoria del trabajo	1
1.1 Descripción del problema de investigación.....	1
1.2 Objetivo.....	2
1.2.1 Objetivo general	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Hipótesis	2
1.3.1 Hipótesis general	2
1.3.2 Hipótesis específicas.....	3
1.4 Variables	3
1.4.1 Variable independiente (V.I)	3
1.4.2 Variable dependiente (V.D)	3
1.5 Antecedentes referenciales	5
1.5.1 Antecedentes internacionales	5
1.5.2 Antecedentes nacionales	5
Capítulo II. Marcos teórico y conceptual	7
2.1 Marco teórico	7
2.1.1 Planificación minera estratégica.....	7
2.1.2 Gestión del riesgo en minería.....	9
2.1.3 Integración del riesgo como herramienta de toma de decisiones	16
2.1.4 Oportunidades derivadas de una buena gestión del riesgo	18
2.2 Marco conceptual.....	20
Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación	23
3.1 Unidad de estudio	23

3.1.1	Ubicación y accesibilidad.	23
3.1.2	Geología	24
3.2	Inventario de recursos y reservas.....	30
3.2.1	Recursos totales	30
3.2.2	Reservas totales	35
3.3	Calculo del Net Smelter Return (NSR)	36
3.3.1	Definición de Net Smelter Return (NSR)	36
3.3.2	Factores que afectan el NSR	36
3.3.3	Base de datos y supuestos	39
3.3.4	Metodología del cálculo de NSR	45
3.4	Planificación minera	51
3.4.1	Métodos de Minado Subterráneo	54
3.4.2	Programa de producción	57
3.5	Evaluación del impacto del riesgo en la planificación	62
3.5.1	Hill of Value HoV	62
3.5.2	Metodología	62
3.5.3	Desarrollo y cálculo del Hill of Value (HoV)	63
3.5.4	Comparación de escenarios con diferentes niveles de riesgo	67
	Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados	72
4.1	Análisis de riesgos y toma de decisiones	72
4.1.1	En la planificación	72
4.1.2	En la operación	73
4.1.3	Legales y de permisos	78
4.2	Calculo del riesgo del proyecto.....	78
4.3	Validación de hipótesis.....	80
	Conclusiones	84
	Recomendaciones	86
	Referencias bibliográficas	87

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 : Matriz de consistencia.....	4
Tabla 2 : Etapas del proceso de planificación	7
Tabla 3 : Recursos minerales	25
Tabla 4 : Recursos totales	30
Tabla 5 : Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Ramal Techo (VRT)	32
Tabla 6 : Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE)	33
Tabla 7 : Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Principal (VPR)	34
Tabla 8 : Reservas totales	35
Tabla 9 : Balance metalúrgico.....	40
Tabla 10: Proyección del precio de los metales	41
Tabla 11: Precios y costos de tratamiento para concentrado de Zn.....	42
Tabla 12: Precios y costos de tratamiento para concentrado de Pb.....	43
Tabla 13: Precios y costos de tratamiento para concentrado de Cu.....	44
Tabla 14: Precio de las commodities	45
Tabla 15: Leyes de balance	45
Tabla 16: Cálculo de NSR de Zn en concentrado de Zn	45
Tabla 17: Cálculo de NSR de Ag en concentrado de Zn	46
Tabla 18: Cálculo de NSR de Pb en concentrado de Pb.....	46
Tabla 19: Cálculo de NSR de Ag en concentrado de Pb.....	47
Tabla 20: Cálculo de NSR de Au en concentrado de Pb.....	47
Tabla 21: Cálculo de NSR de Cu en concentrado de Cu	48
Tabla 22: Calculo de NSR de Ag en concentrado de Cu.....	48
Tabla 23: Cálculo de NSR de Au en concentrado de Cu.....	49
Tabla 24: Resumen de NSR – FOB de mina	49
Tabla 25: NSR por unidad de mineral	50

Tabla 26: Programa de producción por método de explotación	58
Tabla 27: Plan de producción total.....	59
Tabla 28: Plan del balance metalúrgico	60
Tabla 29: Plan de avances lineales.....	61
Tabla 30: Plan de balance de masas	61
Tabla 31: Escenarios de cut-off y tasas de producción	64
Tabla 32: Identificación de la configuración óptima.....	66
Tabla 33: Precio de los metales.....	67
Tabla 34: Ley de mineral y recuperación metalúrgica – Fully case	68
Tabla 35: Costos operativos	68
Tabla 36: Costos de capital.....	69
Tabla 37: Inventario de mineral económico – VLoM.....	69
Tabla 38: Asignación de riesgo por casos.....	73
Tabla 39: Matriz de riesgos – caso 7	79
Tabla 40: Matriz de riesgos – caso 8 (Fully case)	79
Tabla 41: Matriz de riesgos – caso 9	80

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 : Modelo de estimación tradicional versus estimación estocástica	9
Figura 2 : Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros.....	12
Figura 3 : Ubicación de Unidad Minera Ticlio	24
Figura 4 : Domo de Yauli	26
Figura 5 : Columna estratigráfica de Unidad Ticlio	28
Figura 6 : Sección transversal – Geología local	29
Figura 7 : Curva tonelaje – Ley	30
Figura 8 : Inventario de recursos	31
Figura 9 : Vetas con mayor tonelaje.....	31
Figura 10: Cut off – Veta Ramal Techo (VRT)	32
Figura 11: Rescat – Veta Ramal Techo (VRT)	33
Figura 12: Cut off – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE).....	33
Figura 13: Rescat – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE)	34
Figura 14: Cut off – Veta Principal (VPR).....	34
Figura 15: Rescat – Veta Principal (VPR)	35
Figura 16: Evolución de reservas.....	36
Figura 17: Contribución por metal	50
Figura 18: Contribución por concentrado	51
Figura 19: Vista general de la mina – sección longitudinal	53
Figura 20: Plano isométrico – método Bench and Fill	54
Figura 21: Plano isométrico – método Over Cut and Fill	56
Figura 22: Plano isométrico – método SARC	56
Figura 23: LOM y ZnEq por escenario de cut-off.....	65
Figura 24: Inventario planificado por cut-off	66
Figura 25: Inventario de mineral económico – VLoM	70
Figura 26: Análisis de riesgo en la planificación.....	72

Figura 27: Modelo geomecánico	74
Figura 28: Modelo de ventilación	75
Figura 29: Modelo de sistema de bombeo	76
Figura 30: Modelo de sistema eléctrico.....	77
Figura 31: Matriz de riesgos.....	78
Figura 32: Prueba Mann-Whitney Caso 7 vs Caso 8 (Fully case)	81
Figura 33: Prueba Mann-Whitney Caso 8 (Fully case) vs Caso 9	82
Figura 34: Matriz de riesgos – resumen de casos.....	83

Introducción

El trabajo se estructura en cuatro capítulos, cada uno de los cuales aborda aspectos clave para entender el papel del riesgo como una variable estratégica dentro de la planificación minera. El Capítulo I desarrolla el planteamiento del problema, partiendo de los desafíos actuales que enfrenta la minería subterránea frente a contextos de alta incertidumbre geológica, operativa y económica. En este capítulo se formulan los objetivos generales y específicos de la investigación, se definen las hipótesis de trabajo y se identifican las variables involucradas en el estudio. Además, se revisan antecedentes referenciales relevantes que evidencian la necesidad de incorporar un enfoque estratégico del riesgo como herramienta para la sostenibilidad de los activos mineros.

El Capítulo II se centra en el marco teórico y conceptual que sustenta la investigación. Se abordan los fundamentos de la planificación minera estratégica, con énfasis en operaciones subterráneas, y se analiza el concepto de evaluación del riesgo en minería, considerando tanto su dimensión técnica como económica. Asimismo, se examina la integración del riesgo en los modelos de planificación y se presenta un marco conceptual que articula los términos clave utilizados en el estudio, lo que permite establecer una base sólida para el desarrollo posterior del análisis.

En el Capítulo III, se expone la unidad de estudio, la cual corresponde a un caso real de planificación minera subterránea. Se detalla el inventario de recursos y reservas, el cálculo del Net Smelter Return (NSR), así como el diseño del plan minero bajo distintos escenarios. También se analiza el impacto de los distintos niveles de riesgo sobre la planificación, considerando factores geológicos, económicos y operativos, y evaluando cómo estos influyen en la proyección de la vida útil del activo y en la rentabilidad del proyecto.

El Capítulo IV desarrolla un análisis integral del riesgo desde tres dimensiones clave: planificación estratégica, operación minera y aspectos legales y de permisos. Se identifican los principales riesgos asociados a cada dimensión y se evalúan sus

implicancias sobre el cumplimiento de los objetivos del proyecto. Además, se realiza un cálculo comparativo del riesgo aplicado a diferentes escenarios de planificación, lo que permite determinar cuál de ellos representa una opción más favorable en términos de valor económico y sostenibilidad operativa.

Finalmente, el estudio concluye con una síntesis de hallazgos relevantes y un conjunto de recomendaciones prácticas orientadas a fortalecer la gestión del riesgo como un componente esencial en la toma de decisiones estratégicas, promoviendo así una visión más sostenible, rentable y resiliente de los activos mineros.

Capítulo I. Parte introductoria del trabajo

1.1 Descripción del problema de investigación

En la actualidad, la industria minera enfrenta desafíos significativos relacionados con la incertidumbre en la disponibilidad de recursos, la volatilidad de los precios de los metales y condiciones operativas cada vez más exigentes. La planificación minera tradicional, con un enfoque marcadamente conservador, tiende a minimizar el riesgo para garantizar la estabilidad financiera y operativa de los proyectos, lo que puede limitar la capacidad de adaptación ante escenarios cambiantes y complejos.

Uno de los principales problemas radica en la falta de integración del análisis y gestión del riesgo desde las etapas tempranas de planificación. En muchos casos, al evitar escenarios con cierto nivel de incertidumbre, las operaciones mineras desaprovechan oportunidades de optimización a largo plazo, como el uso más eficiente de recursos críticos, la diversificación de métodos de explotación o la incorporación temprana de tecnologías emergentes.

En un entorno caracterizado por alta variabilidad geológica y volatilidad de mercado, se vuelve indispensable contar con herramientas y enfoques que permitan no solo identificar los riesgos, sino también evaluarlos y gestionarlos de forma estratégica. La ausencia de esta visión integral puede conducir a decisiones subóptimas, ineficiencias operativas, sobrecostos y una disminución en la rentabilidad y sostenibilidad del proyecto minero.

Por tanto, se hace necesaria la adopción de un enfoque que incorpore la gestión estratégica del riesgo en la planificación minera, con el fin de fortalecer la resiliencia del proyecto, maximizar la vida útil del activo y generar condiciones para un crecimiento sostenible a largo plazo.

Para abordar esta problemática, nos lleva a realizarnos las siguientes preguntas:

- ¿Cómo puede el análisis estratégico del riesgo en la planificación minera contribuir a maximizar la vida útil del activo y generar oportunidades sostenibles a largo plazo?
- ¿Cuáles son los principales factores de riesgo que afectan la planificación minera y cómo pueden ser gestionados estratégicamente desde etapas tempranas?
- ¿Qué metodologías pueden emplearse para integrar el análisis de riesgo en la planificación minera sin comprometer la viabilidad económica del proyecto?
- ¿Cómo influye el análisis estratégico del riesgo en la optimización del uso de recursos críticos y en la mejora de la toma de decisiones a nivel estratégico?

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo general

Analizar el impacto de la gestión estratégica del riesgo en la planificación minera como herramienta para maximizar la vida útil del activo y promover oportunidades sostenibles a largo plazo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Evaluar cómo la integración de escenarios de riesgo controlado en la planificación minera mejora la resiliencia del proyecto frente a variaciones en la disponibilidad de recursos y precios de los metales.
- Analizar las metodologías utilizadas para integrar el análisis de riesgo en la planificación minera y su influencia en la viabilidad económica del proyecto.
- Evaluar cómo el análisis estratégico del riesgo puede optimizar el uso de recursos críticos y fortalecer la toma de decisiones en proyectos mineros.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis general

El análisis estratégico del riesgo en la planificación minera permite optimizar el uso de recursos críticos, extender la vida útil del activo y generar oportunidades de desarrollo sostenible.

1.3.2 Hipótesis específicas

- La integración de escenarios de riesgo controlado en la planificación minera mejora la resiliencia del proyecto frente a variaciones en la disponibilidad de recursos y en los precios de los metales.
- La aplicación de metodologías avanzadas de análisis de riesgo permite una toma de decisiones más eficiente y adaptable en la planificación minera.
- El análisis estratégico del riesgo facilita la identificación de nuevas oportunidades operativas, tecnológicas o de explotación que contribuyen al valor a largo plazo del proyecto.

1.4 Variables

1.4.1 Variable independiente (V.I)

X1: Nivel de riesgo incorporado en la planificación minera.

1.4.2 Variable dependiente (V.D)

- Y0: Análisis de Datos Históricos.
 - Vida Útil del Activo.
- Y1: Simulación de Escenarios.
 - KPIs Económicos.
 - TIR.
 - VAN.
- Y2: Modelos de Optimización de Recursos.
 - Optimización de Recursos.
- Y3: Impacto en la Sostenibilidad y Rentabilidad del Activo.
 - Generación de Oportunidades Estratégicas.

Tabla 1

Matriz de consistencia

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	INDICADORES
Problema general	Objetivo general	Hipótesis general		
¿Cómo puede el análisis estratégico del riesgo en la planificación minera contribuir a maximizar la vida útil del activo y generar oportunidades sostenibles a largo plazo?	Analizar el impacto de la gestión estratégica del riesgo en la planificación minera como herramienta para maximizar la vida útil del activo y promover oportunidades sostenibles a largo plazo.	El análisis estratégico del riesgo en la planificación minera permitirá optimizar el uso de recursos críticos, extendería la vida útil del activo y generaría oportunidades de desarrollo sostenible.	Y0: Dependiente / Efecto Análisis de Datos Históricos	Vida Útil del Activo
Problema específico 1	Objetivo específico 1	Hipótesis específica 1		
¿Cuáles son los principales factores de riesgo que afectan la planificación minera y cómo pueden ser gestionados estratégicamente desde etapas tempranas?	Evaluar cómo la integración de escenarios de riesgo controlado en la planificación minera mejora la resiliencia del proyecto frente a variaciones en la disponibilidad de recursos y precios de los metales.	La integración de escenarios de riesgo controlado en la planificación minera mejoraría la resiliencia del proyecto frente a variaciones en la disponibilidad de recursos y en los precios de los metales.	X1: Independiente / Causa Nivel de riesgo incorporado en la planificación minera	Y1: Dependiente / Efecto Simulación de Escenarios KPIs Económicos TIR VAN
Problema específico 2	Objetivo específico 2	Hipótesis específica 2		
¿Qué metodologías pueden emplearse para integrar el análisis de riesgo en la planificación minera sin comprometer la viabilidad económica del proyecto?	Analizar las metodologías utilizadas para integrar el análisis de riesgo en la planificación minera y su influencia en la viabilidad económica del proyecto.	La aplicación de metodologías avanzadas de análisis de riesgo permitiría una toma de decisiones más eficiente y adaptable en la planificación minera.		Y2: Dependiente / Efecto Modelos de Optimización de Recursos Optimización de Recursos
Problema específico 3	Objetivo específico 3	Hipótesis específica 3		
¿Cómo influye el análisis estratégico del riesgo en la optimización del uso de recursos críticos y en la mejora de la toma de decisiones a nivel estratégico?	Evaluar cómo el análisis estratégico del riesgo puede optimizar el uso de recursos críticos y fortalecer la toma de decisiones en proyectos mineros.	El análisis estratégico del riesgo facilitaría la identificación de nuevas oportunidades operativas, tecnológicas o de explotación que contribuirían al valor a largo plazo del proyecto.		Y3: Dependiente / Efecto Impacto en la Sostenibilidad y Rentabilidad del Activo Generación de Oportunidades Estratégicas

Fuente: Elaboración propia

1.5 Antecedentes referenciales

1.5.1 Antecedentes internacionales

Ramírez J. (2020) en su tesis de postgrado titulada, “Metodología de planificación de la producción de minas a cielo abierto considerando la flexibilidad ante la incertidumbre del precio del commodity”; esta tesis se centra en la incertidumbre del precio de los commodities, un riesgo financiero significativo, y propone una metodología para aumentar la flexibilidad en la planificación.

Morales N. (2016) en su tesis de maestría titulada, “Análisis de riesgo asociado a incertidumbre operacional en planes mineros para minería a cielo abierto”; este estudio aborda la incertidumbre operacional, un componente clave del riesgo, en la planificación de minas a cielo abierto, validando modelos para planes quincenales.

Gómez P. (2014) en su tesis de maestría titulada, “Planeamiento minero como función de la variación de la ley de corte crítica”; este trabajo examina cómo las fluctuaciones en la ley de corte crítica, influenciadas por factores de riesgo económicos y de mercado, impactan directamente la planificación y la vida útil de la mina.

Martínez L. (2012) en su tesis de maestría titulada, “Planeamiento de minas a cielo abierto mediante optimización estocástica”. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. Esta investigación propone el uso de la optimización estocástica, una técnica que permite modelar la incertidumbre y el riesgo en el proceso de planificación minera.

1.5.2 Antecedentes nacionales

Flores R. (2021) en su tesis de postgrado titulada, “Análisis de la incertidumbre regulatoria y su impacto en la planificación de inversiones en el sector minero peruano”; esta tesis examina cómo la incertidumbre en las políticas y regulaciones gubernamentales peruanas afecta la planificación de las inversiones a largo plazo en el sector minero.

Pérez A. (2020) en su tesis de maestría titulada, “Impacto de la volatilidad del precio del cobre en la planificación de la producción de una mina a gran escala en el Perú”; esta tesis explora cómo las fluctuaciones en el precio del cobre, un riesgo financiero significativo

en el contexto peruano, afectan la planificación de la producción y la rentabilidad de las operaciones mineras a gran escala.

López C. (2019) en su tesis de maestría titulada, “Desarrollo de un modelo para la gestión de riesgos ambientales en la planificación de operaciones mineras en la Amazonía peruana”; este estudio se enfoca en los riesgos ambientales específicos de la Amazonía peruana y propone un modelo para su gestión dentro de la planificación minera, considerando la sensibilidad del ecosistema.

González M. (2018) en su tesis titulada, “Análisis de riesgos geológicos y geotécnicos en la planificación de proyectos mineros subterráneos en los Andes peruanos”. Este trabajo se centra en los riesgos geológicos y geotécnicos, particularmente relevantes en la compleja geografía de los Andes peruanos, y su influencia en la planificación y la seguridad de los proyectos mineros subterráneos.

Rodríguez S. (2016) en su tesis titulada, “Evaluación del riesgo social en la planificación de proyectos mineros y su impacto en la obtención de la licencia social en el Perú”. Esta tesis aborda el creciente riesgo social asociado a los proyectos mineros en el Perú y cómo este factor debe integrarse en la planificación para asegurar la viabilidad y la aceptación de los proyectos.

Capítulo II. Marcos teórico y conceptual

2.1 Marco teórico

2.1.1 Planificación minera estratégica

La planificación minera estratégica en minería subterránea es un proceso clave para definir el desarrollo y explotación eficiente de un yacimiento subterráneo, buscando maximizar el valor económico del activo a lo largo de su vida útil, sin comprometer la seguridad, la sostenibilidad ni la viabilidad técnica del proyecto.

A diferencia de la minería a tajo abierto, la minería subterránea presenta desafíos particulares relacionados con el acceso al mineral, la ventilación, el sostenimiento de excavaciones, la geotecnia y la gestión del recurso en un entorno tridimensional más complejo. Por ello, la planificación estratégica subterránea requiere un análisis más detallado de aspectos técnicos, económicos y geológicos desde una etapa temprana.

Tabla 2

Etapas del proceso de planificación

PASO	ACCIÓN	DETALLES
1	Preparación general	Designar roles. Realizar análisis de los <i>stakeholder</i> . Determinar propósito y alcances.
2	Preparación de las entradas para el estudio	▪ Información acerca de exploración y derecho minero en el área de interés. ▪ Información de recursos, incluyendo reportes, mapas, datos de sondajes y modelos de bloques para el área de interés. ▪ Para minas existentes, información acerca de la operación y equipos, instalaciones de procesamiento e infraestructura. ▪ Información acerca de métodos de explotación y procesamiento que se puede considerar en el estudio. ▪ Información acerca de leyes ambientales y métodos de explotación y detalles de exploración y derecho minero. ▪ Pronóstico de demanda y precios del commodity. ▪ Pronóstico de costos futuros.
3	Marco	Determina el set de decisiones y alternativas que serán analizadas como parte del estudio.
4	Valoración	Dirige las alternativas de modelamiento, optimización y evaluación económica. Evaluación de riesgo de las principales alternativas.
5	Selección	Selecciona la mejor alternativa de plan. Selecciona las acciones para preservar opciones futuras.

Fuente: VOLCAN Cía. Minera S.A.

2.1.1.1 Objetivos de la planificación estratégica subterránea. Maximizar el valor presente del activo minero, considerando las restricciones geológicas, operativas y económicas.

- Definir el método de explotación más adecuado, como corte y relleno, sublevel stoping, block caving, entre otros.
- Determinar la secuencia óptima de minado, evaluando accesos, ventilación y desarrollo de infraestructura.
- Minimizar riesgos geotécnicos y operacionales, especialmente en zonas de alta presión, fracturamiento o riesgo sísmico.
- Garantizar la sostenibilidad del proyecto, incluyendo criterios de seguridad, impacto ambiental y estabilidad a largo plazo.

2.1.1.2 Elementos clave de la planificación estratégica subterránea

Modelado geológico y estimación de recursos:

Es el primer insumo crítico. Una interpretación detallada del cuerpo mineralizado — ley, volumen, geometría, continuidad— permite establecer la base sobre la cual se evalúan diferentes escenarios de explotación. La calidad del modelo geológico influye directamente en la calidad de la planificación.

Selección del método de explotación:

Cada yacimiento subterráneo presenta condiciones geomecánicas y estructurales únicas. La selección del método de minado debe equilibrar factores como la recuperación del mineral, la dilución, la seguridad operativa, los costos de desarrollo y los tiempos de producción. Esta decisión tiene un impacto profundo en la vida útil del activo.

Diseño de la infraestructura subterránea:

Incluye rampas, galerías, chimeneas de ventilación, puntos de extracción y sistemas de transporte. La planificación estratégica debe prever el desarrollo secuencial de estas obras, optimizando tiempos y recursos, y considerando su reutilización futura.

Ventilación y seguridad:

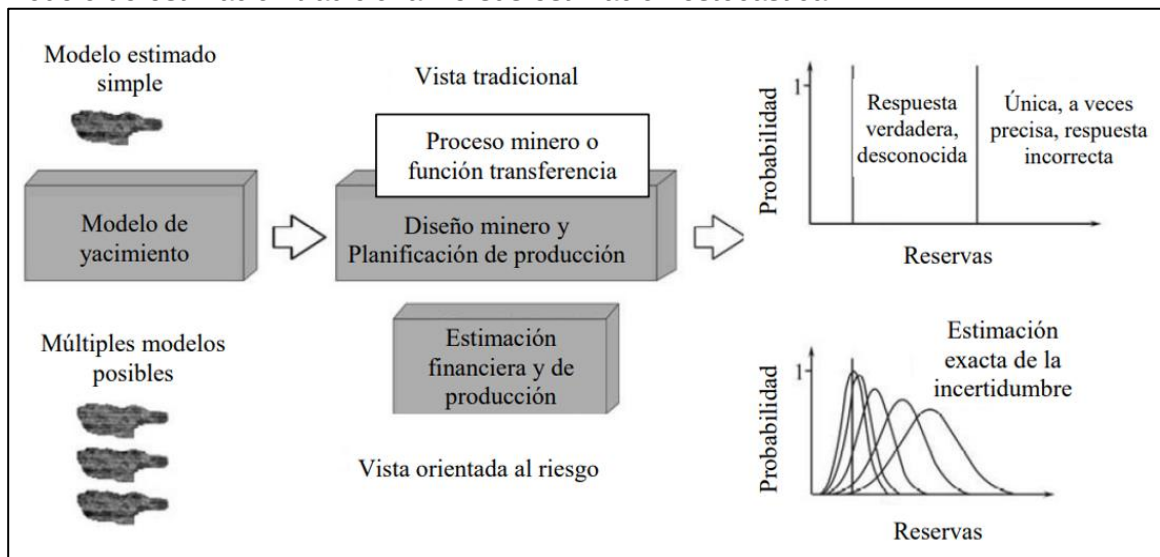
La planificación debe contemplar el diseño de un sistema de ventilación eficiente, acorde a los métodos de explotación, volumen de producción y tipos de equipos utilizados. La gestión de gases, temperatura y polvo es crítica para la seguridad y eficiencia operativa.

Secuencia de explotación y horizonte de planificación:

Una secuencia mal estructurada puede afectar la recuperación del mineral o provocar pérdidas geotécnicas irreversibles. La planificación de mediano y largo plazo debe garantizar una continuidad productiva y económica, anticipando posibles contingencias.

Figura 1

Modelo de estimación tradicional versus estimación estocástica



Fuente: Dimitrakopoulos, 2007

2.1.2 Gestión del riesgo en minería

La evaluación del riesgo es un componente esencial en la planificación minera, especialmente en contextos de alta incertidumbre como los que enfrenta la minería subterránea. El objetivo principal de esta evaluación es identificar, cuantificar y gestionar los riesgos que pueden afectar negativamente el desempeño técnico, económico o ambiental del proyecto minero.

En un entorno tan dinámico como el de la industria minera, los riesgos pueden surgir en cualquier etapa del ciclo de vida del proyecto, desde la exploración hasta el cierre de mina, e incluyen tanto incertidumbres geológicas como fluctuaciones de mercado, riesgos geotécnicos, fallas en la infraestructura o condiciones regulatorias cambiantes.

2.1.2.1 Tipos de riesgos en minería. Según el trabajo de Duzgun y Einstein (2004), los riesgos en minería pueden clasificarse en varias categorías:

2.1.2.1.1 Riesgos geológicos. Estos riesgos se derivan de la incertidumbre inherente al conocimiento del subsuelo. Aun con campañas de exploración avanzadas, siempre existe un margen de error en la interpretación del modelo geológico. Entre los factores más relevantes se incluyen:

- Ley del mineral: variabilidad inesperada en la concentración de elementos valiosos, lo que puede afectar la rentabilidad del proyecto.
- Geometría del yacimiento: errores en la estimación de su forma, profundidad, continuidad o límites.
- Presencia de zonas estériles o fallas estructurales: estas pueden dificultar la extracción, generar inestabilidad geotécnica o reducir el tonelaje explotable.

Este tipo de riesgo es crítico en minería subterránea, donde la visibilidad y acceso al cuerpo mineral es limitado y los costos de corrección son altos.

2.1.2.1.2 Riesgos operacionales. Relacionados con la ejecución diaria de las operaciones mineras, estos riesgos afectan directamente la seguridad, eficiencia y continuidad operativa. Entre ellos se incluyen:

- Fallas mecánicas y tecnológicas: averías de equipos de perforación, acarreo o ventilación, que pueden paralizar la operación.
- Condiciones geomecánicas adversas: desprendimientos, colapsos, presencia de agua subterránea o gases peligrosos.
- Deficiencias en ventilación o drenaje: que pueden comprometer la salud del personal y la estabilidad del entorno subterráneo.
- Accidentes laborales: por error humano, falta de capacitación o incumplimiento de protocolos de seguridad.

Estos eventos no solo afectan la producción, sino que también pueden generar impactos legales y reputacionales.

2.1.2.1.3 Riesgos económicos. Son riesgos de carácter financiero y comercial, influenciados por variables de mercado y macroeconómicas:

- Fluctuaciones en el precio del mineral: los ingresos dependen del precio de mercado, el cual es volátil y puede desplomarse en ciclos bajistas.
- Costos operativos e insumos: alzas en energía, explosivos, repuestos o mano de obra afectan los márgenes.
- Tipo de cambio e inflación: en países con monedas débiles o economías inestables, el valor de los insumos y de los ingresos puede variar de forma impredecible.

Una mala estimación de estos factores puede llevar a decisiones subóptimas en la planificación minera, afectando la rentabilidad del proyecto.

2.1.2.1.4 Riesgos ambientales y sociales. Estos riesgos derivan de la interacción del proyecto minero con el entorno natural y humano:

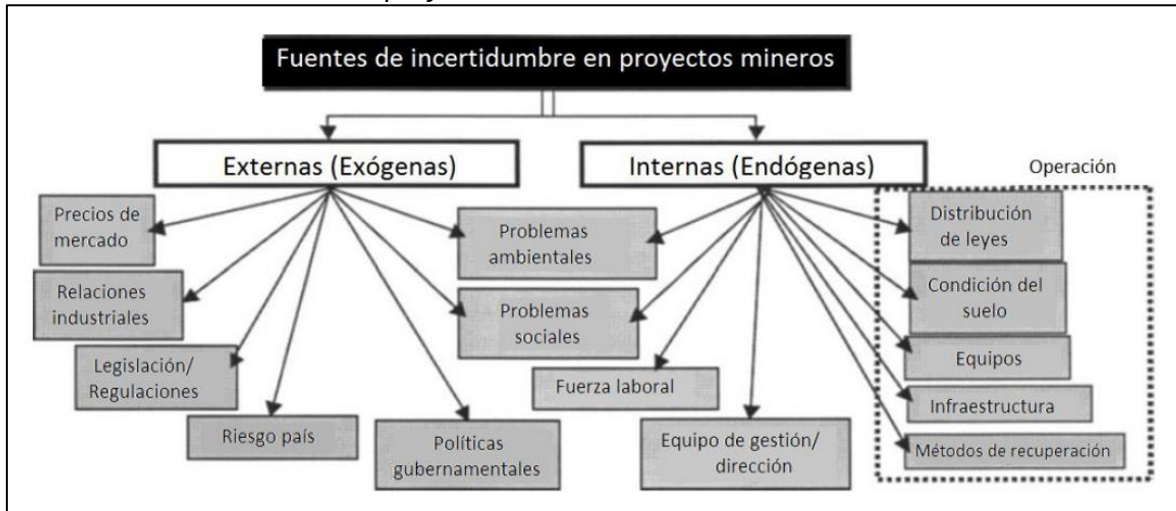
- Impactos ambientales: contaminación de suelos y aguas, generación de residuos tóxicos, alteración de ecosistemas.
- Oposición comunitaria: conflictos con comunidades locales por uso del agua, desplazamiento de poblaciones, empleo o acceso a tierras.
- Regulación ambiental y legal: cambios legislativos pueden exigir nuevas inversiones en mitigación o paralizar el proyecto.

Estos riesgos suelen tener consecuencias a largo plazo y pueden detener una operación incluso si es técnicamente viable.

Estos factores no actúan de forma aislada, sino que interactúan, amplificando sus efectos. Por ello, la evaluación de riesgo debe incorporar un enfoque sistémico e interdisciplinario.

Figura 2

Fuentes de incertidumbre en proyectos mineros



Fuente: Mayer, Kazakidis, 2007

2.1.2.2 Proceso de evaluación del riesgo. La evaluación del riesgo sigue generalmente una metodología basada en los siguientes pasos (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2009):

2.1.2.2.1 Identificación del riesgo. Es el primer paso del proceso y consiste en reconocer todos los posibles eventos, condiciones o fuentes de incertidumbre que puedan generar impactos adversos sobre el proyecto. En minería, esto incluye aspectos como:

- Inestabilidad geotécnica en zonas críticas del yacimiento.
- Fluctuaciones imprevistas en los precios de los metales.
- Cambios regulatorios que afecten permisos ambientales o concesiones.
- Oposición social o conflictos con comunidades locales.

La identificación debe involucrar equipos multidisciplinarios y considerar información histórica, registros operacionales y conocimiento experto.

2.1.2.2.2 Análisis del riesgo. Una vez identificados, los riesgos deben ser analizados en términos de su probabilidad de ocurrencia y su impacto potencial. Este análisis puede realizarse:

- Cualitativamente, mediante matrices de riesgo que clasifican los eventos en función de su severidad y frecuencia (alto, medio, bajo).

- Cuantitativamente, a través de herramientas como análisis estadísticos, simulación Monte Carlo, análisis de sensibilidad o árboles de decisión, que permiten cuantificar la incertidumbre y asignar valores económicos a los impactos posibles.

Este paso es crucial para priorizar los riesgos que requieren atención inmediata.

2.1.2.2.3 Evaluación del riesgo. Aquí se compara el nivel de cada riesgo con los criterios de aceptación previamente establecidos (por ejemplo, límites financieros, estándares ambientales o normativas legales). La finalidad es decidir si un riesgo es:

- Insignificante, tiene un impacto prácticamente nulo o despreciable en el proyecto.
- Menor, causa una interrupción o daños leves, sin poner en riesgo el desarrollo general del proyecto.
- Moderado, tiene un impacto tangible en el proyecto, con consecuencias económicas, ambientales o de salud importantes pero controlables.
- Mayor, representa una amenaza seria para el éxito del proyecto, involucrando grandes pérdidas o afectaciones.
- Catastrófico, tiene consecuencias devastadoras e irreversibles, que pueden llevar a la cancelación del proyecto o a severas implicancias legales, sociales y económicas.

Esta etapa permite tomar decisiones estratégicas basadas en la relación riesgo-beneficio.

2.1.2.2.4 Tratamiento del riesgo. Consiste en desarrollar e implementar acciones para manejar los riesgos de forma eficiente. Las principales estrategias incluyen:

- Evitar el riesgo (por ejemplo, eliminando una actividad).
- Reducir la probabilidad o el impacto (mejorando el diseño, adoptando tecnologías).
- Compartir o transferir el riesgo (contratando seguros, alianzas con terceros).
- Aceptar el riesgo, cuando su impacto es mínimo o se justifica por la rentabilidad.

En minería, es común usar planes de contingencia y ajustes operativos como parte del tratamiento del riesgo.

2.1.2.2.5 Monitoreo y revisión. La evaluación del riesgo no es un evento puntual, sino un proceso dinámico. Se requiere un seguimiento constante para:

- Verificar si las condiciones del entorno han cambiado.
- Evaluar la eficacia de las acciones implementadas.
- Actualizar la matriz de riesgos según nueva información.

Este control continuo permite una gestión proactiva y adaptativa frente a la incertidumbre.

Herramientas como simulación Monte Carlo, análisis de sensibilidad, árboles de decisión o modelos estocásticos se utilizan ampliamente en minería para cuantificar la incertidumbre y tomar decisiones más informadas (Silva & Sánchez, 2015).

2.1.2.3 Beneficios de una evaluación estratégica del riesgo. La incorporación del análisis estratégico del riesgo en la planificación minera, particularmente en operaciones subterráneas, genera ventajas competitivas y técnicas sustanciales. Más allá de identificar peligros, permite gestionar la incertidumbre de manera proactiva, favoreciendo decisiones que equilibran el riesgo con el valor económico potencial del proyecto. A continuación, se detallan los principales beneficios:

2.1.2.3.1 Mejora de la resiliencia del proyecto. Una evaluación estratégica permite anticiparse a escenarios adversos, tales como condiciones geológicas imprevistas, fallos operacionales o caídas en los precios del mineral. Esto fortalece la capacidad de respuesta y adaptación del proyecto frente a contingencias, reduciendo la probabilidad de interrupciones críticas o desviaciones presupuestarias (ICMM, 2009).

2.1.2.3.2 Optimización del uso de recursos. El análisis de riesgo permite priorizar zonas con mayor valor esperado, incluso si presentan incertidumbre, siempre que esta sea controlada o mitigable. Según Dimitrakopoulos (2011), esta visión estratégica puede incrementar la rentabilidad del proyecto, al asignar recursos de manera eficiente y alinear la explotación con los objetivos económicos de largo plazo.

2.1.2.3.3 Mayor flexibilidad operativa. Integrar el riesgo en la planificación permite ajustar el diseño y la secuencia minera conforme cambian variables críticas, como la ley del mineral, la productividad esperada o las condiciones del mercado. Esta flexibilidad operativa se traduce en una gestión dinámica del plan de mina, adaptada a nuevos escenarios sin comprometer la viabilidad técnica.

2.1.2.3.4 Garantía de sostenibilidad económica y técnica. Considerar el riesgo desde etapas tempranas permite diseñar planes más robustos y sostenibles, que contemplan contingencias operativas, ambientales y legales. Esto mejora la viabilidad a largo plazo del activo minero, al mitigar impactos económicos derivados de eventos inesperados y mantener la rentabilidad a pesar de condiciones adversas (Silva & Sánchez, 2015).

2.1.2.4 Riesgo como generador de oportunidades. Un enfoque moderno en planificación minera no busca eliminar el riesgo, sino gestionarlo estratégicamente para convertirlo en oportunidades. Esto incluye:

2.1.2.4.1 Exploración en zonas de alto valor e incertidumbre. Una de las oportunidades más relevantes que ofrece una gestión estratégica del riesgo es la posibilidad de incorporar al plan minero zonas con alto valor económico pero baja certeza geológica. Si bien estas áreas implican mayor incertidumbre, mediante el uso de planes de contingencia, modelamientos probabilísticos y seguimiento técnico intensivo, es posible mitigar el riesgo y capturar el valor potencial oculto en el recurso (Dimitrakopoulos, 2011).

2.1.2.4.2 Incorporación de tecnologías emergentes. Tecnologías como sensores en tiempo real, sistemas automatizados de perforación y modelamiento predictivo aumentan inicialmente el riesgo operativo o financiero debido a su novedad o inversión requerida. No obstante, su implementación controlada puede reducir la variabilidad operativa, aumentar la seguridad y mejorar la productividad, generando ventajas competitivas sostenibles a lo largo del ciclo de vida del activo (Silva & Sánchez, 2015).

2.1.2.4.3 Diseño de planes mineros flexibles. Un plan de mina rígido tiende a fracasar frente a escenarios adversos. En cambio, diseñar planes flexibles y adaptativos, que consideren distintos escenarios económicos, técnicos y legales, permite responder ágilmente a cambios en la ley del mineral, costos operativos o condiciones del mercado. Este enfoque fortalece la resiliencia organizacional y favorece una toma de decisiones más estratégica (ICMM, 2009).

Como lo indica Shaw y Dimitrakopoulos (2019), la planificación minera basada en escenarios y el uso de simulación geológica permiten integrar el riesgo como una variable activa en la toma de decisiones estratégicas.

2.1.3 Integración del riesgo como herramienta de toma de decisiones

La integración del riesgo en la planificación minera no debe entenderse únicamente como una medida preventiva, sino como una herramienta estratégica de toma de decisiones que permite a los responsables del proyecto anticiparse a distintos escenarios, adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno y descubrir nuevas oportunidades para generar valor.

En lugar de evitar el riesgo, la planificación moderna busca entenderlo, modelarlo y utilizarlo de forma controlada, lo que resulta especialmente importante en minería subterránea, donde las condiciones del yacimiento y las variables operacionales pueden presentar una alta incertidumbre.

2.1.3.1 La planificación bajo incertidumbre. La minería es una industria intensiva en capital y dependiente de factores inciertos como la ley del mineral, los precios de los metales, la geotecnia o la demanda del mercado. En este contexto, la planificación tradicional basada en valores promedio (enfoque determinista) ha demostrado ser insuficiente.

Según Dimitrakopoulos y Ramazan (2004), la planificación minera que incorpora la incertidumbre mediante técnicas estocásticas permite evaluar decisiones bajo múltiples escenarios posibles, en lugar de un único caso base. Esto mejora la calidad de las decisiones, ya que permite identificar alternativas más robustas y adaptables.

2.1.3.2 Herramientas para integrar el riesgo en la toma de decisiones.

Algunas herramientas clave utilizadas en minería para la toma de decisiones estratégicas bajo riesgo son:

- **Simulación Monte Carlo:**

Genera miles de escenarios posibles de producción o rentabilidad con base en distribuciones probabilísticas (Silva & Sánchez, 2015).

- **Optimización estocástica:**

Permite maximizar el valor esperado del proyecto considerando restricciones y variables inciertas (Ramazan & Dimitrakopoulos, 2013).

- **Análisis de escenarios:**

Compara los resultados bajo diferentes condiciones (precios, leyes, costos), identificando rangos críticos de desempeño.

- **Árboles de decisión y valor en riesgo (VaR):**

Cuantifican el impacto económico de distintos caminos posibles en el proyecto.

Estas herramientas no solo apoyan la gestión del riesgo, sino que ayudan a evaluar opciones estratégicas, como invertir en desarrollo adicional, aplicar nuevas tecnologías o cambiar la secuencia de explotación.

2.1.3.3 Riesgo como fuente de valor. Contrario a la creencia de que el riesgo solo implica amenaza, su integración adecuada permite detectar oportunidades ocultas. Por ejemplo, Dimitrakopoulos (2011) argumenta que, al evaluar escenarios inciertos, es posible identificar zonas del yacimiento que, si bien presentan mayor variabilidad, también pueden ofrecer mayores retornos si se planifican con medidas de control y contingencia.

Asimismo, la capacidad de la operación de responder rápidamente a cambios del mercado (como precios altos) depende de haber considerado tales escenarios desde la planificación inicial. Esto proporciona una ventaja competitiva frente a operaciones menos flexibles.

En este sentido, integrar el riesgo permite mejorar la resiliencia y agilidad del proyecto, cualidades fundamentales en un entorno global cambiante y cada vez más exigente.

2.1.3.4 Decisiones estratégicas basadas en evaluación de riesgo. Entre las decisiones que pueden beneficiarse directamente de una integración efectiva del riesgo en minería subterránea, destacan:

- Diseño de la secuencia de minado bajo escenarios alternativos.
- Definición de la política de reservas (cut-off grades) adaptativa.
- Planeamiento de inversiones escalonadas (desarrollo por fases).
- Priorización de zonas con mayor valor bajo riesgo controlado.
- Aprovechamiento de ventanas de oportunidad (precios altos del mercado).

Todo esto contribuye no solo a reducir pérdidas potenciales, sino también a maximizar el valor del activo minero de forma sostenible.

2.1.4 Oportunidades derivadas de una buena gestión del riesgo

En el contexto minero, la gestión del riesgo no solo debe entenderse como una práctica defensiva para evitar pérdidas, sino también como una fuente activa de generación de oportunidades. Una evaluación y gestión del riesgo eficaz permiten optimizar la planificación, fortalecer la resiliencia operativa y descubrir áreas de mejora o expansión que de otro modo podrían permanecer ocultas bajo una visión conservadora.

2.1.4.1 Toma de decisiones estratégicas con base en el riesgo. Cuando se evalúan riesgos de forma estructurada, las empresas mineras pueden tomar decisiones estratégicas más sólidas, ya que tienen una visión clara de las posibles desviaciones respecto al plan base y de sus implicancias financieras, técnicas y ambientales (International Council on Mining and Metals [ICMM], 2015). Esta claridad facilita, por ejemplo:

- Identificar oportunidades para adelantar o postergar inversiones.
- Aprovechar ciclos de precios altos mediante producción flexible.

- Evaluar nuevos sectores del yacimiento que eran descartados bajo análisis deterministas.

Estas decisiones agregan valor no solo en el corto plazo, sino también extienden la vida útil del activo minero, lo que es crítico en minería subterránea, donde los márgenes de maniobra son más limitados.

2.1.4.2 Mejora en el uso de recursos y eficiencia operativa. Una buena gestión del riesgo permite un uso más eficiente de los recursos disponibles, como equipos, energía, mano de obra y reservas minerales. Esto se logra a través de:

- Priorización de zonas de alto valor esperado, aunque tengan mayor incertidumbre, siempre que se gestione adecuadamente.
- Diseño adaptable de planes de minado, que permite responder a condiciones inesperadas sin afectar la continuidad operacional (Leite & Dimitrakopoulos, 2007).
- Reducción de sobrecostos y tiempos muertos, al tener previstas rutas alternativas o contingencias ante eventos críticos.

Todo esto se traduce en una mayor rentabilidad y sostenibilidad del proyecto, dos aspectos fundamentales para el éxito a largo plazo.

2.1.4.3 Ventaja competitiva y sostenibilidad. La gestión estratégica del riesgo también genera ventajas competitivas. Empresas mineras capaces de incorporar el riesgo en sus modelos de negocio y planificación están mejor preparadas para enfrentar entornos volátiles. Estas capacidades incluyen:

- Mayor rapidez de reacción ante crisis o cambios de mercado.
- Capacidad de diferenciarse frente a inversionistas y stakeholders, al demostrar una visión integral de largo plazo.
- Mejora de la reputación corporativa, al operar con responsabilidad y previsión, lo cual fortalece las relaciones con comunidades, reguladores y otros actores (Kemp et al., 2010).

Además, esta visión está alineada con los principios de minería responsable y sostenible, que exigen anticipar riesgos sociales, ambientales y económicos desde la etapa de planificación.

2.1.4.4 Identificación de proyectos emergentes o tecnologías innovadoras.

La apertura a escenarios de riesgo controlado favorece la exploración de nuevas tecnologías o modelos de negocio que pueden parecer inciertos en el corto plazo, pero que ofrecen retornos significativos en el largo. Esto incluye:

- Implementación de automatización y minería digital, que aunque inicialmente presentan desafíos técnicos y culturales, pueden mejorar la seguridad y eficiencia (World Economic Forum, 2017).
- Evaluación de proyectos de menor escala con alta incertidumbre geológica, que pueden ser rentables bajo ciertos escenarios.
- Desarrollo de minería flexible, adaptable a distintos niveles de producción según demanda o precios del mercado.

En este sentido, una buena gestión del riesgo estimula la innovación y la visión a largo plazo dentro de la organización minera.

2.2 Marco conceptual

Riesgo:

Probabilidad de que un evento incierto afecte positiva o negativamente los objetivos del proyecto minero, incluyendo factores económicos, sociales, ambientales y operativos.

Incertidumbre:

Falta de certeza sobre eventos futuros que pueden influir significativamente en decisiones y resultados de los proyectos mineros.

Planificación minera:

Proceso que organiza las actividades y recursos desde la exploración hasta el cierre de la mina, buscando maximizar el valor del yacimiento de forma sostenible.

Incremento del riesgo:

Aumento en la magnitud, frecuencia y complejidad de los riesgos en minería, debido a factores como la volatilidad del mercado, exigencias socioambientales y la incertidumbre normativa.

LOM (Life of Mine):

Enfoque que considera todo el ciclo de vida del activo minero, optimizando su valor desde la exploración hasta la post-minería.

LoA (Life of Asset):

Enfoque técnico-operacional que considera todo el ciclo de vida del activo minero, optimizando su valor.

Inversión:

Desembolso de capital para desarrollar, operar y mantener un proyecto minero, abarcando todas las etapas, desde la exploración hasta la expansión de operaciones.

Budget:

Plan financiero anual que estima ingresos, costos y gastos en minería, sirviendo como herramienta de planificación y control.

Forecast:

Proyección financiera y operativa que se actualiza periódicamente, basada en tendencias, precios y condiciones del mercado.

OPEX:

Costos operativos diarios para mantener la mina funcionando (energía, personal, suministros, mantenimiento, etc.).

CAPEX:

Inversiones en activos de largo plazo (infraestructura, maquinaria, construcción) necesarias para operar o expandir la mina.

Contribución:

Margen que queda tras deducir los costos variables de producción, útil para cubrir costos fijos y medir la rentabilidad operativa.

Plan de cierre de mina:

Documento que detalla cómo se dismantelará y rehabilitará un sitio minero tras el fin de sus operaciones, asegurando una transición ambiental y socialmente responsable.

Capítulo III. Desarrollo del trabajo de investigación

La planificación minera es un proceso complejo y dinámico que depende de múltiples factores técnicos, económicos, geológicos y ambientales. Comprender estos factores es esencial para optimizar la explotación de los reservas, recursos y maximizar la rentabilidad del proyecto minero, garantizando al mismo tiempo la sostenibilidad a largo plazo.

3.1 Unidad de estudio

3.1.1 *Ubicación y accesibilidad.*

La mina Ticlio se ubica en la región central del Perú, entre los distritos de Chicla (Lima) y Morococha (Junín), a altitudes entre 4,600 y 5,000 msnm. Está a 130 km de Lima y 40 km de La Oroya, conectada por carretera y ferrocarril. Se encuentra en una zona estratégica del distrito minero de Morococha, con acceso a infraestructura clave como energía, transporte y comunicaciones.

En sus alrededores operan importantes empresas mineras como Chinalco, Panamerican Silver y Austria Duvaz. La propiedad de la mina, perteneciente a Volcan Cía. Minera S.A.A., abarca 909.44 hectáreas distribuidas en 116 concesiones. Su ubicación geológica está dominada por el Domo de Yauli, una estructura asimétrica de gran extensión que influye en la configuración del terreno.

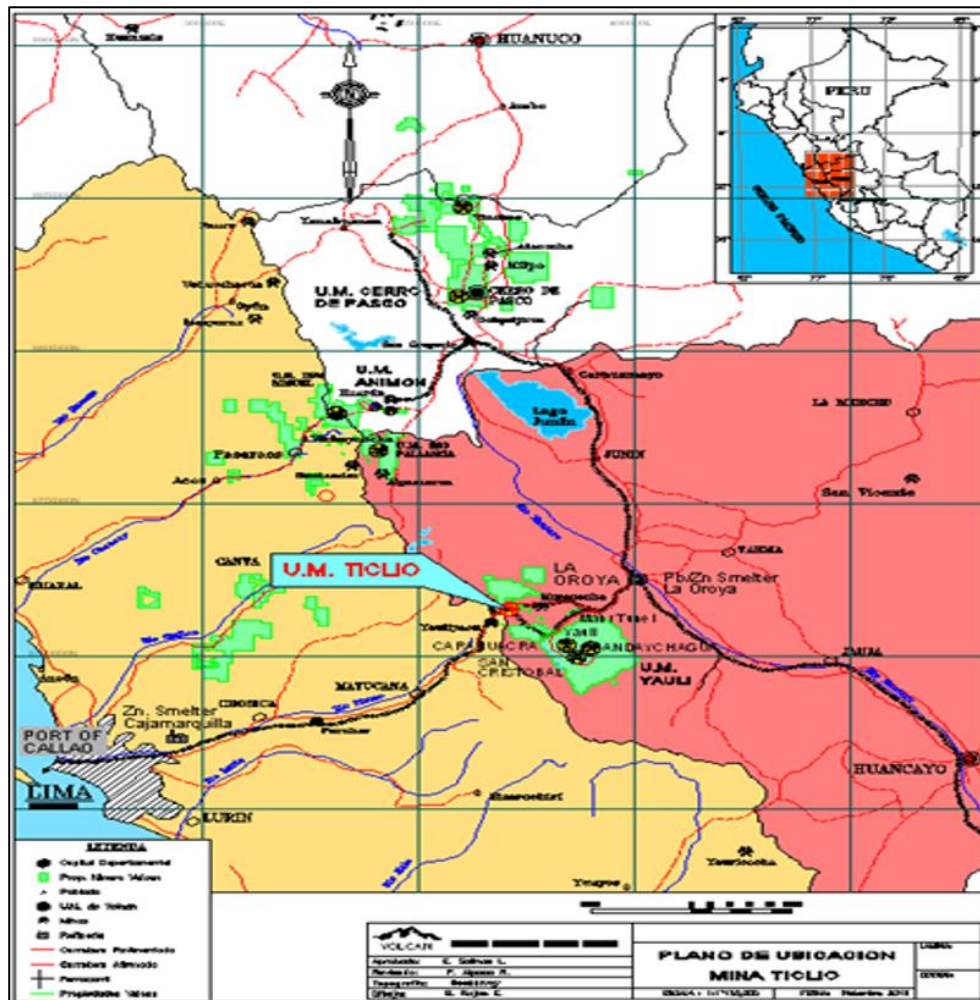
3.1.1.1 Clima. La mina Ticlio experimenta temperaturas que oscila entre los 8°C y -5°C durante todo el año. Por lo tanto, el clima es frígido y seco. El aire tiene 50 % menos de oxígeno que una localidad costera lo que ocasiona que la gran mayoría de persona que pasan por este punto padezcan el mal de altura o soroche.

3.1.1.2 Recursos naturales. El principal recurso natural del área de estudio es los minerales polimetálicos que contiene su sub suelo, así podemos mencionar a minerales plomo, zinc, plata, cobre y otros. En su superficie no se observan especies vegetales de gran importancia ya que el efecto erosivo en esta parte de la cordillera central es alta mente predominante. Sin embargo el recurso agua producto de la desglaciación a formado

grandes volúmenes de agua que su almacenamiento no crea un valor agregado salvo la laguna de Tucto.

Figura 3

Ubicación de Unidad Minera Ticlio



Fuente: Cía. Minera Volcan

3.1.2 Geología

Los recursos minerales son fundamentales para la planificación minera, ya que determinan la viabilidad económica del yacimiento. Su cantidad, calidad y distribución influyen en el método de explotación, la infraestructura necesaria y la vida útil de la mina. Son concentraciones naturales de minerales cuya extracción puede ser rentable. Su estimación se basa en estudios geológicos y pueden variar según factores como tecnología, precios o infraestructura. Solo se consideran recursos aquellas zonas con

posibilidad razonable de extracción. Se clasifican por su grado de certeza en: inferidos, indicados y medidos, siendo estos últimos los más confiables.

Para el plan de producción del 2025 (Estimación a junio 2024) se tienen los siguientes recursos:

Tabla 3

Recursos minerales

RECURSOS	Ore (Mt)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz/t)
Medido	1.3	5.3	1.3	0.2	1.70
Indicado	2.8	4.3	0.9	0.2	1.43
Inferido	5.6	4.7	1.0	0.2	2.13
Jun-24	9.7	4.8	1.1	0.3	1.94
Dic-23	9.9	4.7	1.1	0.3	1.94
Dic-22	9.8	4.6	1.1	0.3	2.02
Dic-21	11.2	4.1	1.1	0.3	2.05
Dic-20	9.8	4.0	1.0	0.3	1.91

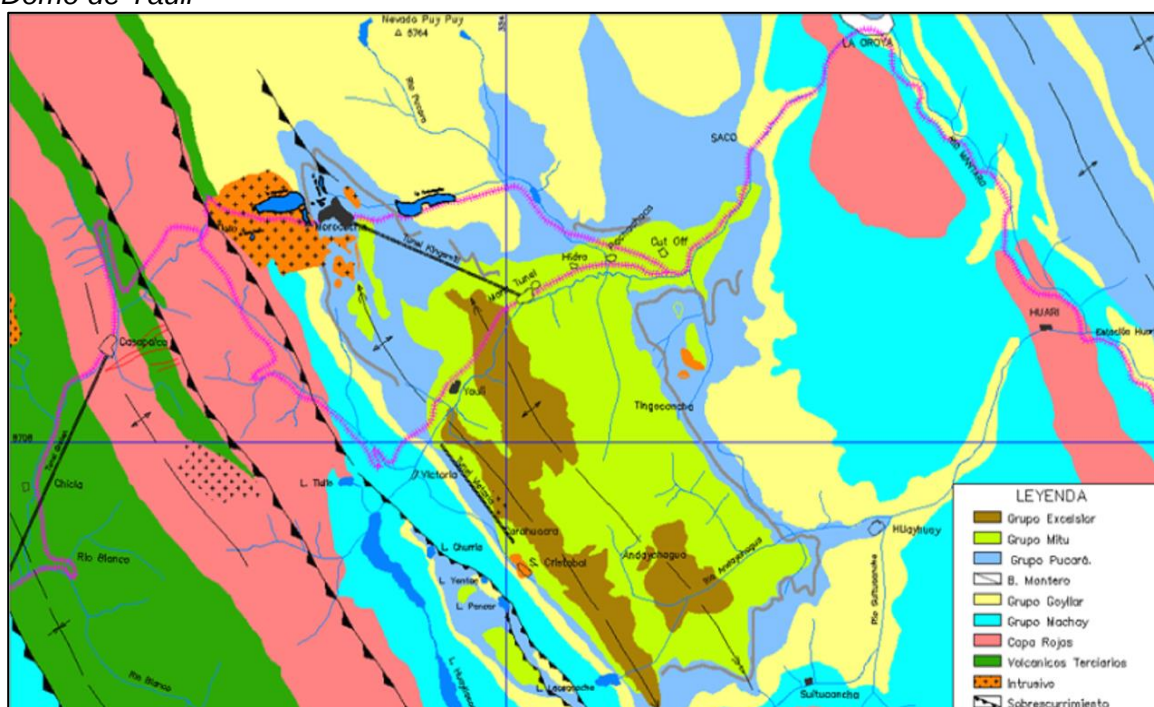
Fuente: Cía. Minera Volcan

3.1.2.1 Geología regional. En el distrito de Morococha, colindante con la mina Ticlio, operan empresas como Minera Argentum (Panamerican Silver) y Minera Austria Duvaz. También existen propiedades de Centraminas y otros terceros. En la zona están asentadas las comunidades campesinas de San Mateo, Pucará y Yauli.

La mina Ticlio pertenece a Volcan Cía. Minera S.A.A., con una extensión de 909.44 hectáreas distribuidas en 116 concesiones. Se localiza dentro del Domo de Yauli (DY), una estructura geológica regional de 35 km de largo y 10–15 km de ancho, caracterizada por una forma elongada y orientación N40°W. Este domo contiene tres anticlinales principales: Pomacocha, San Cristóbal–Morococha y Ultimátum.

Figura 4

Domo de Yauli



Fuente: Cía. Minera Volcan

Geológicamente, el DY es una ventana estructural donde afloran el zócalo paleozoico en el centro y rocas sedimentarias mesozoicas y cenozoicas en los flancos. La zona está intruida por diversos plutones como la Diorita Anticona y la Cuarzomonzonita Ticlio.

Un sistema de fracturas NE-SW y un importante lineamiento N120°E atraviesan el área, controlando la morfología y la ubicación de los principales depósitos minerales.

El área Ticlio–Morococha alberga mineralizaciones polimetálicas (Pb-Zn-Ag-Cu) y cuerpos tipo pórfido (Cu-Mo-Au), asociados a eventos intrusivos del Terciario medio a superior. Estas mineralizaciones están influenciadas por una serie de orogenias (Peruana, Incaica y Quechua) que plegaron intensamente las rocas desde el Pre-mesozoico hasta el Mioceno, dando origen a estructuras como el anticlinal Morococha.

3.1.2.2 Estratigrafía. La columna estratigráfica de la zona presenta una compleja sucesión de unidades geológicas que abarcan desde el Cretáceo hasta el Terciario. En la base se encuentra el Grupo Goyllarisquizga (Cretáceo), compuesto por

una secuencia de areniscas y lutitas con intercalaciones de basaltos amigdaloides, diabásicos, cuarcitas y calizas grises. Esta unidad termina en una caliza fosfática oscura que marca el inicio del Grupo Machay.

El Grupo Machay, también del Cretáceo, está conformado por calizas grises oscuras con restos fósiles, que afloran al norte del abra Anticona. Estas calizas evolucionan hacia niveles más claros y presentan intercalaciones de lutitas y horizontes fosfáticos hacia la parte superior.

La Formación Jumasha, que sobreyace a la Pariatambo, está compuesta por calizas y dolomitas de colores gris claro, blanquecino y amarillento. En contacto con intrusivos como la diorita Anticona, se forman skarns férricos con presencia de wollastonita y débil marmolización. Esta formación es atravesada por estructuras tensionales que controlan la mineralización tipo veta observada en Ticlio.

La Formación Casapalca (Terciario) se caracteriza por sus capas rojas y el conglomerado Carmen, ubicados al oeste del yacimiento. Está compuesta por lutitas, areniscas, limolitas y calizas rojizas. Estas litologías han sido skarnificadas por intrusivos dacíticos y dioríticos, generando hornfels con calco-silicatos y epidota. Esta formación también incluye una secuencia volcánica de aglomerados, tufos y brechas, con una edad comprendida entre el Cretáceo superior y el Eoceno medio.

La Formación Carlos Francisco consiste en una potente serie de rocas volcánicas divididas en tres miembros, entre ellos los Volcánicos Tablachaca. Estas unidades incluyen tufos, brechas, conglomerados y rocas porfiríticas que afloran al oeste del yacimiento. Si bien hay afloramientos de otras unidades volcánicas, como los Tufos Yauliyacu, sus características no son representativas en la zona de Ticlio.

Finalmente, en las partes más altas del área y con mayor extensión hacia el norte, se encuentra la Formación Río Blanco, representada por una potente serie de volcanitas bien estratificadas de tipo andesítico, conocidas como los Volcánicos Pacococha. Estas rocas sobreyacen a la diorita Anticona y constituyen la cobertura volcánica dominante en el sector norte del yacimiento.

Figura 5

Columna estratigráfica de Unidad Ticlio

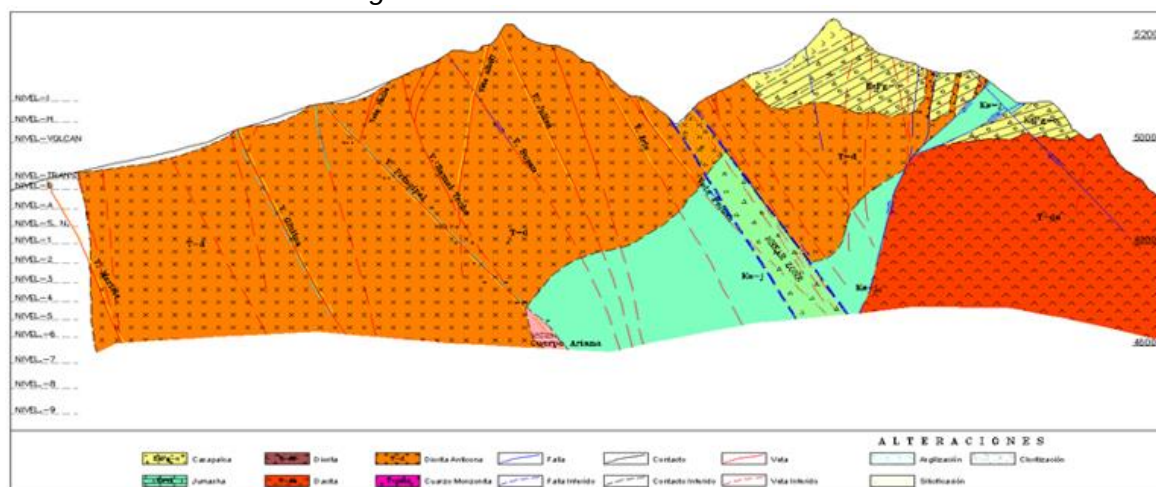
ERA	SISTEMA	EPOCA	EDADES PISOS	UNIDAD LITOLÓGICA	GRAFICO	FORMACION SEDIMENTARIA	FORMACION IGNEA	MINERALIZACION
CENOZOICA	CUATERNARIO					SEDIMENTOS NO CONSOLIDADOS		
	TERCIARIO			CAPAS ROJAS CASAPALCA		DISCORDANCIA CONGLOMERADOS CALCAREOS CALIZAS LUTITAS CALCAREAS ARENISCAS ROJIZAS	INTRUSIVOS INTERMEDIOS CUARZO-DIORITAS	
MESOZOICA	CRETACIO	INFERIOR	CONACHADO	FORMACION JUMASHA		DOLOMITAS MASIVAS POCO FOSILIFERAS	CUELLOS DE BASALTOS A TRAVES DE TODAS LAS FORMACIONES	
		NEOCENICO		GRUPO MAYO		ALTERNANCIA DE CALIZAS MARGOSAS BITUMINOSAS	BASALTO	
		(BOCKET)		FORMACION CHULEC		ALTERNANCIA DE CALIZAS FOSILIFERA LUTITAS ROJA ARENISCAS	BASALTO	
				GRUPO GOLLER			DIORITA + CUARZO	
MESOZOICA	TRIASICO JURASICO	INFERIOR O EODURADICO	SHIRUPILLO PITANILLO	GRUPO PUCARA		CALIZAS BLANCAS AMARILLAS BRECHAS CALCAREAS CHERT		MINERALIZACION ESTRATIGRAFICA DE FE, ZN, PS CON COMPOSICION DE MINERALIZACION HORIZONTAL FORMA DE CUERPOS Y ANTOS
		SUPERIOR O MESOTRIASICO	RETATES POTANILLO		FORMACION ARANCHAY	CAUZAS CON YESO	DERRAMES DE BASALTO	
					FORMACION CHANIBARA	CAUZAS ARENOSAS		
						DISCORDANCIA	DERRAMES DE DIOITA Y ANDESITA INTRUSIVO INTERMEDIO TIPO CARAHUACRA	MINERALIZACION ESTRATIGRAFICA DE ZN, PS, AG, CU
PALEOZOICA	PERMICO	SUPERIOR	OCCHA	GRUPO MITU		LENES DE ARENISCAS Y CONGLOMERADOS	INTRUSIVO TIPO CARAHUACRA CUARZO- MONDITA Y DIOITA ANTICONA	MINERALIZACION HIDROTHERMAL EN VETAS DE ZN, PS, AG, CU, QZ, SB
	DEVONICO	NEONO	GUADALUPE LEONARDO			DISCORDANCIA	VOLCANICOS VOLCANOCLASTIC DE MORADOS	
		SUPERIOR	CHALTAUCURU		GRUPO EXCELSIOR		FILITAS	INTRUSIVO ACIDO TIPO CHUNPE GRANITOS VOLCANICOS VERDES
	INTERMEDIO	BRIAN (HAMILTON)		MARMOLES FOSILIFEROS				
			LISTER			CUARCITAS		
INFORMACIÓN BASE: CERRO DE PASCO CORP. J. H. W. KOSE								
POR: J. VILCA M. DIB: G. ROJAS E. ENERO 1995								

Fuente: Cía. Minera Volcan

3.1.2.3 Geología local. El yacimiento Ticlio es de tipo hidrotermal filoneano, con mineralización en vetas, cuerpos de reemplazo y brechas en calizas Jumasha, además de mantos y pequeños cuerpos de pirita. La mineralización se relaciona con fracturas en rocas dioríticas, andesíticas y calizas, producto del contacto intrusivo entre la diorita Anticona y las calizas Jumasha.

Figura 6

Sección transversal – Geología local



Fuente: Cía. Minera Volcan

Las vetas principales incluyen Julisa, Escondida, Giuliana, Rosario, Milagro, Iris, Silvia, Pelusa, Blanca y Andrea, predominando un rumbo NE-SW con potencias de 0.10 a 2.00 m y extensiones de hasta 1200 m. Presentan estructuras cimoides, zonas de cizallamiento, y una mineralogía dominada por esfalerita, galena, cobres grises, pirita, rodocrosita y cuarzo, con diseminación de calcopirita en niveles profundos.

El cuerpo Ariana es un manto lenticular mineralizado en el contacto caliza-intrusivo, de aproximadamente 150 m de largo por 40 m de ancho y 30 m de espesor. Su mineralización ocurre mayoritariamente por reemplazo en calizas silicificadas y marmolizadas, con fisuras y geodas que permiten filtraciones. Estructuras como la veta Principal, Ramal Techo y otras vetas menores han actuado como feeders, aportando mineralización hacia Ariana.

La veta Principal, explotada ampliamente, tiene rumbo NE-SW y buzamiento de 65°-70° SE, con una extensión de 1250 m horizontal y más de 530 m en vertical. Su contenido mineralógico incluye esfalerita, galena, cuarzo y pirita, alojados en una diorita porfirítica alterada.

La veta Ramal Techo, ubicada al sur de la Principal, también tiene rumbo NE-SW, formando lazos cimoides y uniones con ella. Tiene una extensión horizontal de 800 m y más de 726 m en vertical, con anchos que varían entre 0.5 y 6 m, alcanzando hasta 15 m

en zonas de unión. El ensamble mineralógico es similar, con presencia adicional de minerales argentíferos y cobres grises. Se ha observado un comportamiento tipo stockwork entre Ramal Techo y Julisa.

3.2 Inventario de recursos y reservas

3.2.1 Recursos totales

Para esta estimación se tiene los siguientes recursos, ver tabla 4.

Tabla 4

Recursos totales

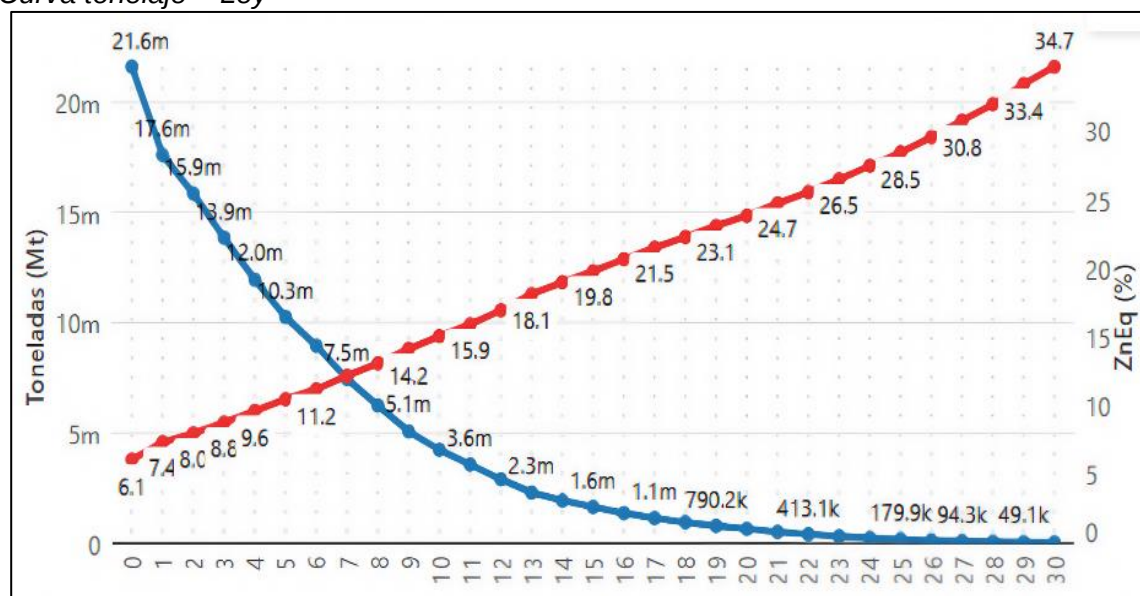
CATEGORÍA	TONELADAS	PV (m)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz)	ZnEq (%)	NSR
1-Medido	1,602,376	2.22	4.89	1.10	0.43	2.01	9.67	174
2-Indicado	3,278,037	3.60	4.17	0.82	0.26	1.50	7.51	135
3-Inferido	6,491,348	5.32	4.47	0.97	0.29	2.12	8.77	158
4-Potencial	4,490,393	2.97	2.72	0.80	0.33	1.91	6.67	120
Total	15,862,153	3.99	3.96	0.90	0.31	1.92	8.01	144

Fuente: Cía. Minera Volcan

La distribución de curva tonelaje de los recursos se muestra en la figura 7.

Figura 7

Curva tonelaje – Ley

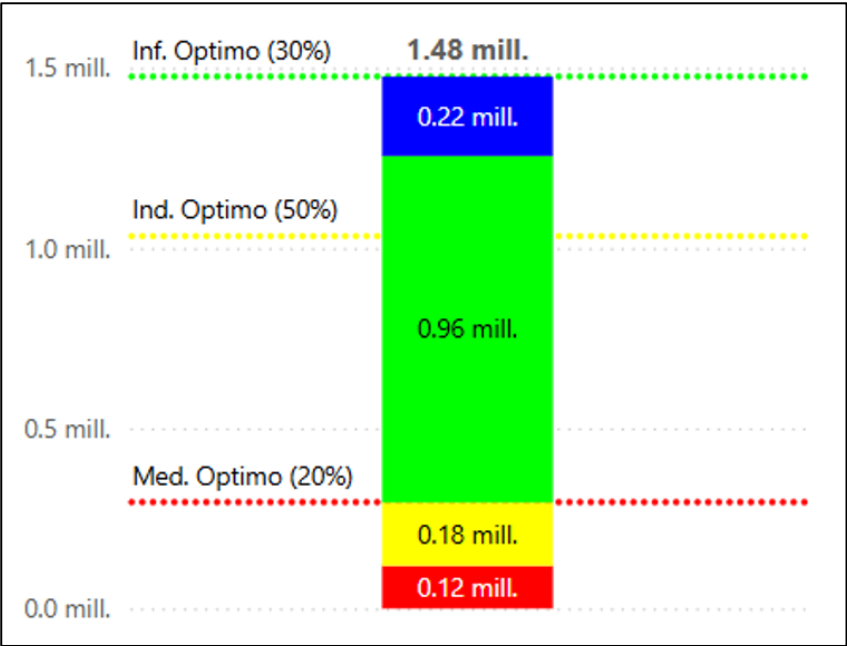


Fuente: Cía. Minera Volcan

Se tiene como objetivo del recursos llegar al 20% del inventario como medido, 50% indicado y 30% inferido, sin embargo se presenta la siguiente configuración, ver figura 8.

Figura 8

Inventario de recursos

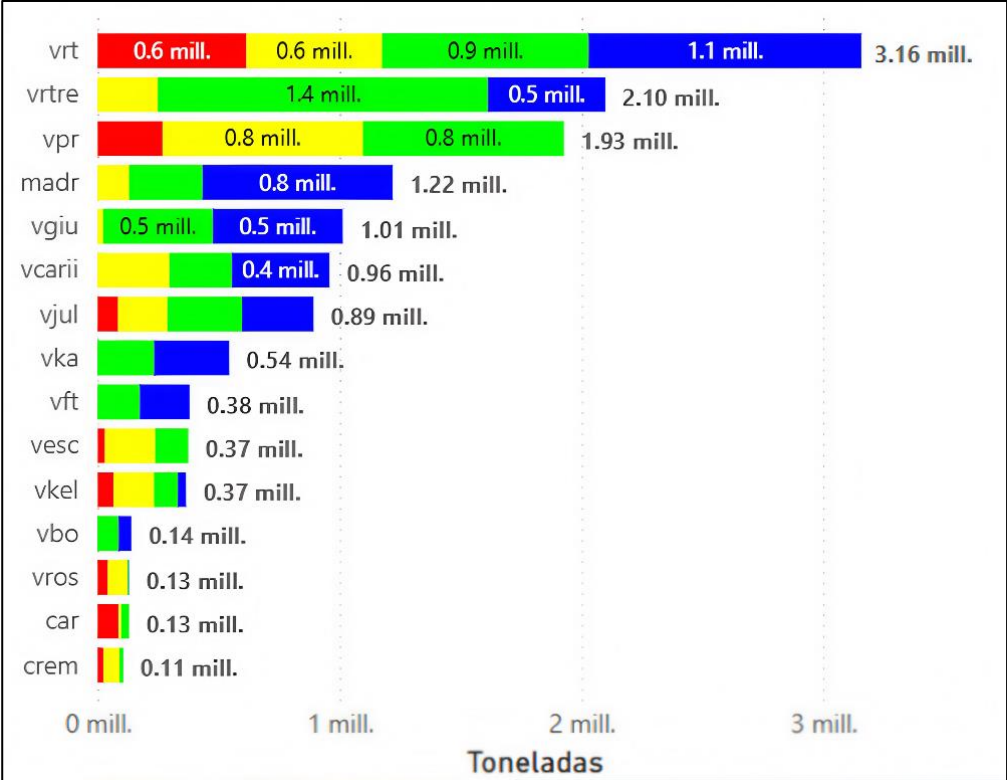


Fuente: Cía. Minera Volcan

En cuanto a las vetas más representativas por el volumen de aporte de recurso se tiene lo siguiente, ver figura 9.

Figura 9

Vetas con mayor tonelaje



Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 5

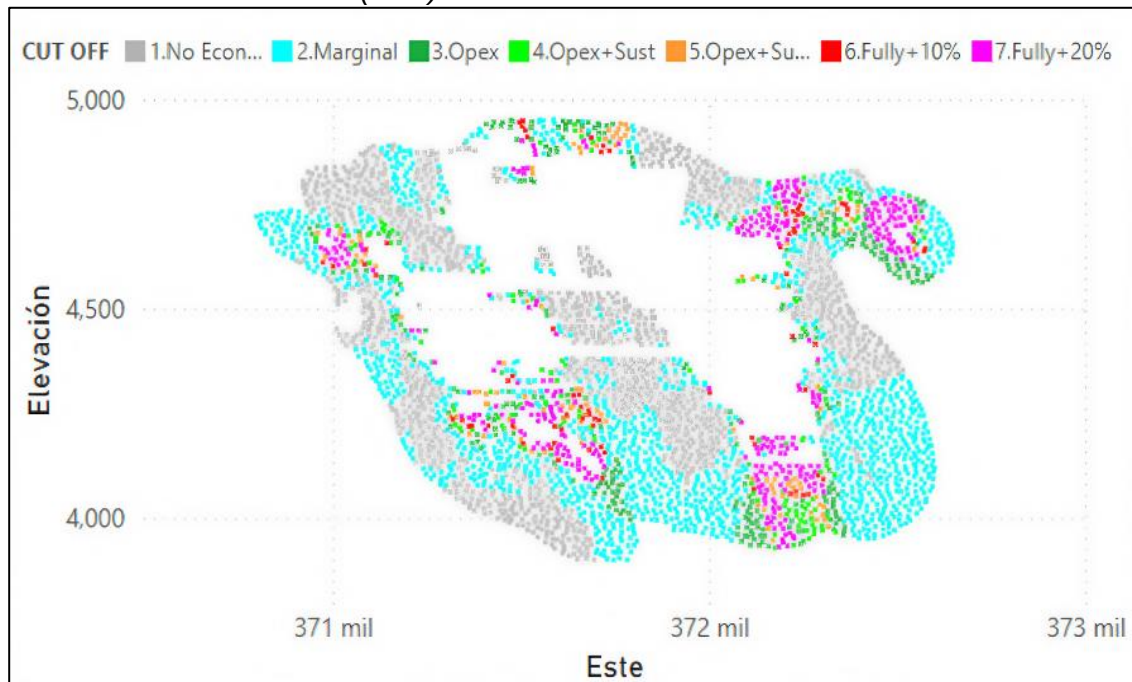
Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Ramal Techo (VRT)

CATEGORÍA	TONELADAS	PV (m)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz)	ZnEq (%)	NSR
1-Medido	616,366	1.76	4.27	0.86	0.40	1.96	8.72	157
2-Indicado	560,007	1.51	3.47	1.10	0.36	2.11	8.04	145
3-Inferido	854,024	1.21	3.71	1.34	0.58	2.97	10.24	185
4-Potencial	1,127,874	1.12	2.82	0.75	0.64	2.52	8.58	155
Total	3,158,271	1.34	3.46	0.99	0.53	2.46	8.96	162

Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 10

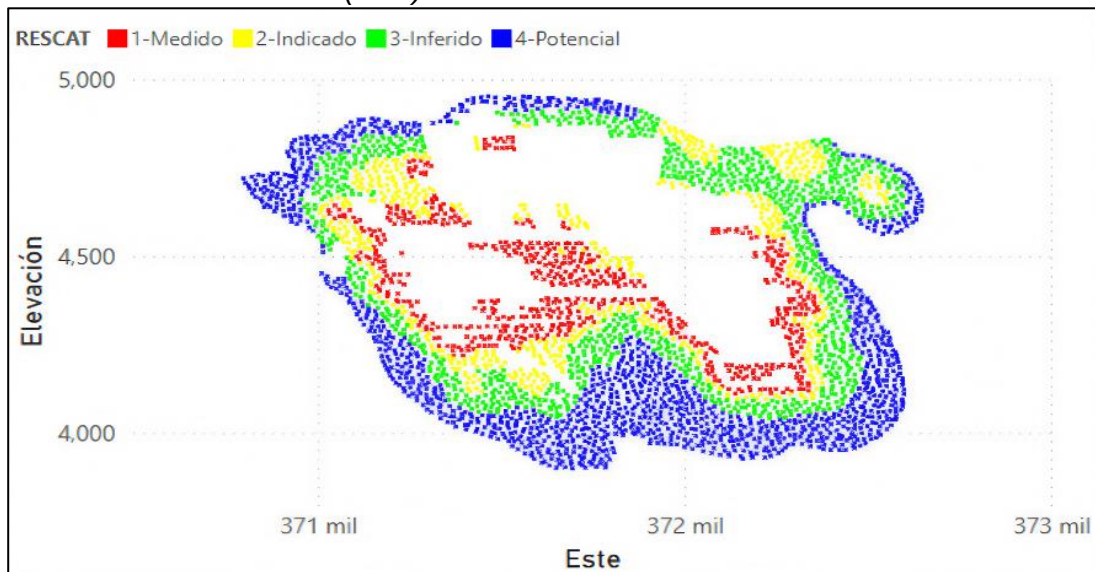
Cut off – Veta Ramal Techo (VRT)



Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 11

Rescat – Veta Ramal Techo (VRT)



Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 6:

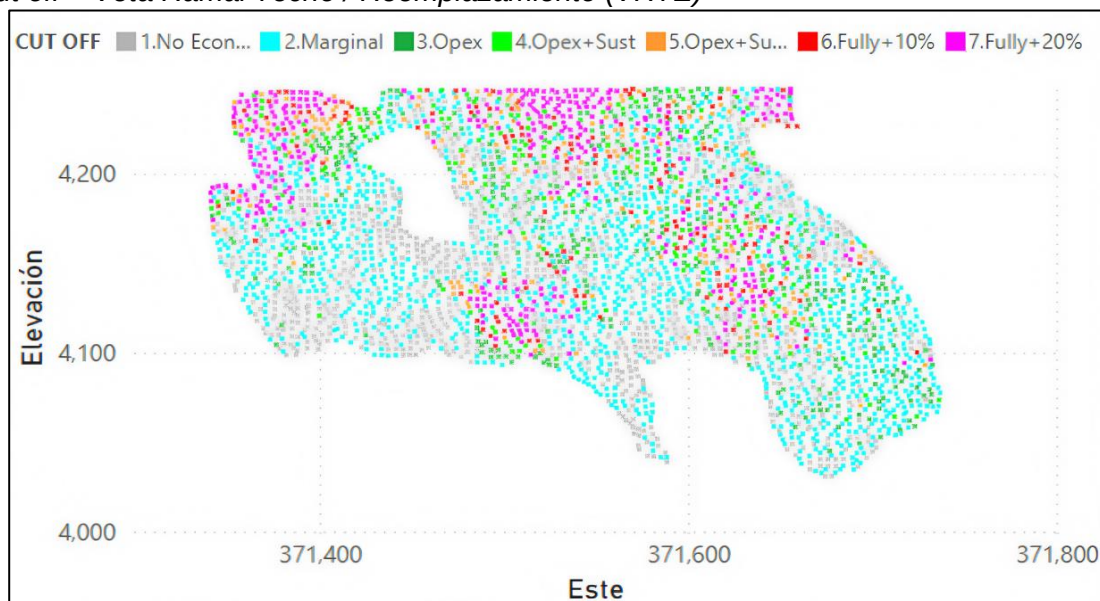
Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE)

CATEGORÍA	TONELADAS	PV (m)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz)	ZnEq (%)	NSR
2-Indicado	249,069	14.30	9.00	0.87	0.40	2.18	14.09	254
3-Inferido	1,365,350	13.07	6.83	0.71	0.29	1.65	10.66	192
4-Potencial	484,945	9.66	5.28	0.49	0.34	1.57	8.73	157
Total	2,099,363	12.43	6.73	0.68	0.31	1.70	10.62	192

Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 12

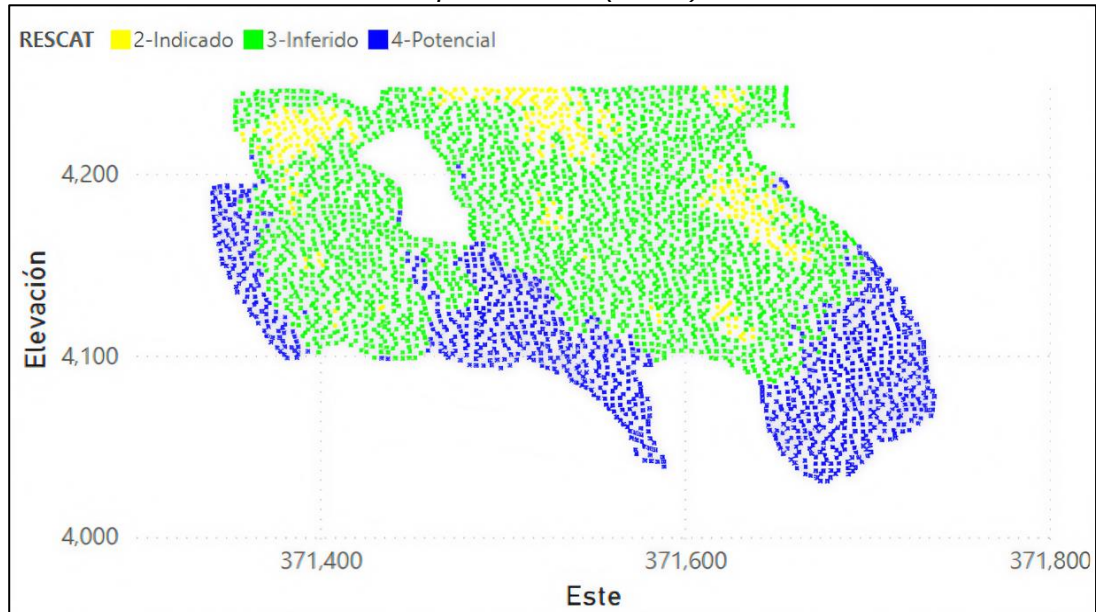
Cut off – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE)



Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 13

Rescat – Veta Ramal Techo / Reemplazamiento (VRTE)



Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 7

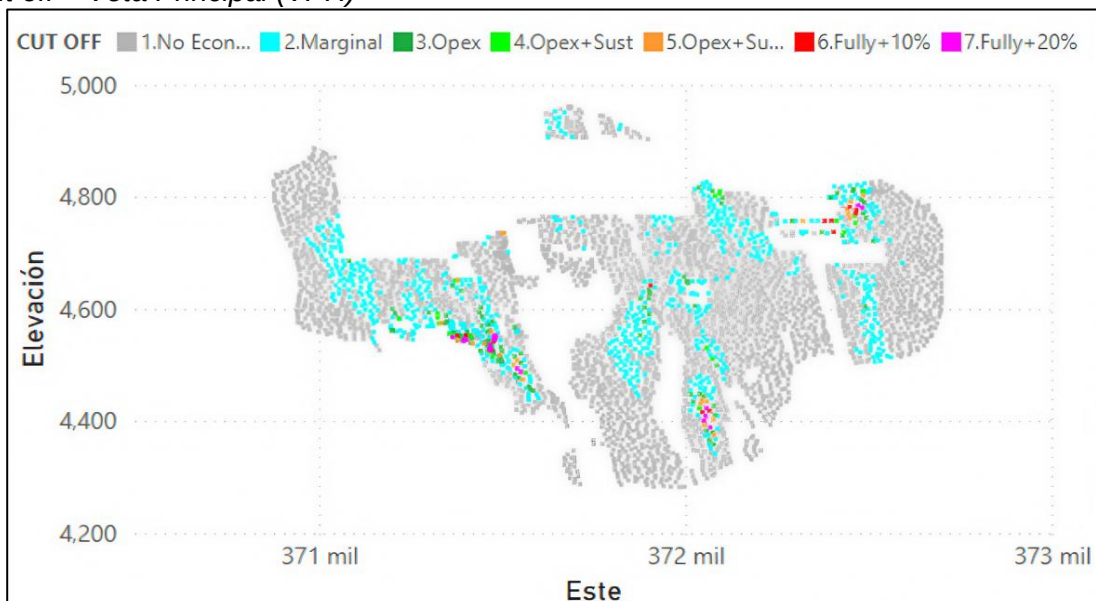
Recursos fuera del Ore Inventory – Veta Principal (VPR)

Categoría	Toneladas	PV (m)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz)	ZnEq (%)	NSR
1-Medido	269,136	1.92	3.97	1.13	0.08	1.50	6.84	123
2-Indicado	828,184	1.94	3.53	0.75	0.17	1.16	6.02	109
3-Inferido	830,582	1.42	3.00	0.69	0.12	1.10	5.19	94
Total	1,927,902	1.71	3.36	0.78	0.13	1.18	5.78	104

Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 14

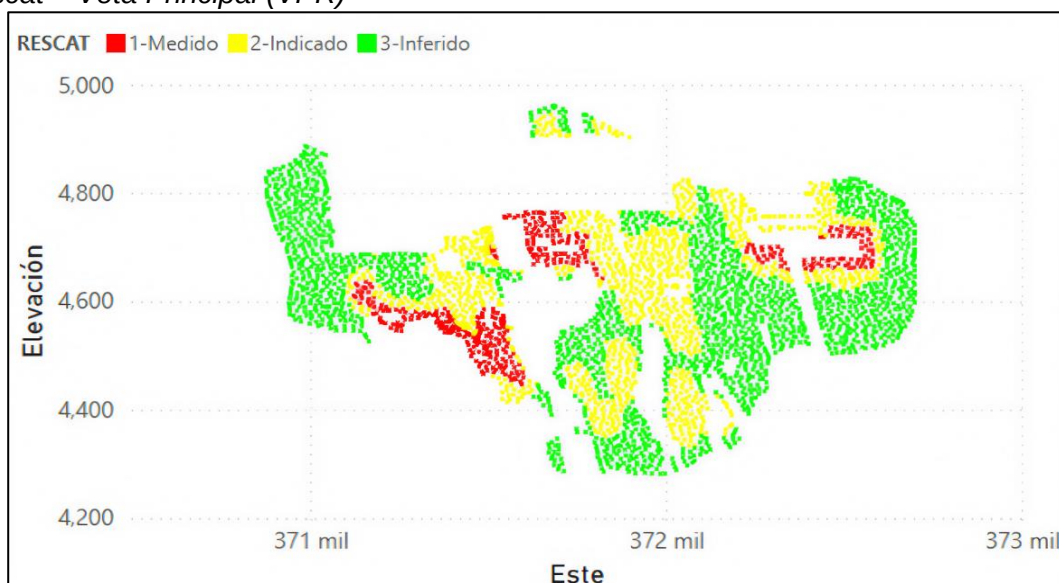
Cut off – Veta Principal (VPR)



Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 15

Rescat – Veta Principal (VPR)



Fuente: Cía. Minera Volcan

3.2.2 Reservas totales

Las reservas minerales son la parte económicamente extraíble de un recurso medido o indicado, considerando pérdidas por dilución y mermas. Su definición requiere estudios de prefactibilidad o factibilidad, que evalúan factores técnicos, económicos, legales y sociales bajo condiciones realistas.

Estas estimaciones son dinámicas y pueden cambiar con nueva información. Aunque se basan en análisis técnicos, conllevan cierto grado de incertidumbre y pueden variar según el criterio del evaluador. Aun así, deben sustentarse con datos sólidos y realizarse de buena fe.

Para el año 2025, se tiene las siguientes reservas, ver tabla 8.

Tabla 8

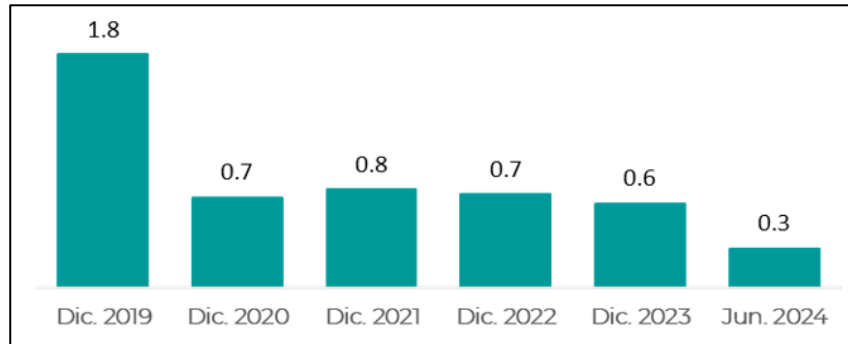
Reservas totales

Reservas	Ore (Mt)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz/t)
Probado	0.1	6.0	0.8	0.1	0.72
Probable	0.2	7.2	0.6	0.3	1.59
Jun-24	0.3	7.0	0.7	0.3	1.40
Dic-23	0.6	5.9	0.7	0.4	1.76
Dic-22	0.7	5.0	0.7	0.4	1.53
Dic-21	0.8	5.2	0.8	0.4	1.96
Dic-20	0.7	5.8	1.0	0.5	2.51

Fuente: Cía. Minera Volcan

Figura 16

Evolución de reservas



Fuente: Cía. Minera Volcan

3.3 Cálculo del Net Smelter Return (NSR)

3.3.1 Definición de Net Smelter Return (NSR)

El Net Smelter Return (NSR) o "Retorno Neto de Fundición" es un indicador económico clave en minería que representa el valor neto que se obtiene de la venta de los metales contenidos en un mineral, después de descontar costos asociados a su procesamiento, refinación, transporte y penalidades por impurezas.

El NSR es utilizado para evaluar la viabilidad económica de un depósito y para optimizar la planificación minera, ayudando a definir zonas rentables de extracción y su secuencia de explotación.

Matemáticamente, el NSR se expresa como:

$$NSR = \sum((Precio_{metal} * Ley_{metal} * Recuperacion_{metal}) - Costos) \quad (1)$$

Donde:

$Precio_{metal}$ = Precio de venta del metal en el mercado.

Ley_{metal} = Contenido del metal en el mineral (generalmente expresado en g/t o %).

$Recuperación_{metal}$ = Porcentaje del metal que se recupera en el proceso metalúrgico

$Costos$ = Costos de procesamiento, refinación, transporte y penalidades.

3.3.2 Factores que afectan el NSR

El NSR es influenciado por múltiples variables, entre ellas:

- **Ley del Mineral:**

A mayor contenido metálico en el mineral, mayor será el valor del NSR.

- **Recuperación Metalúrgica:**

La eficiencia del proceso metalúrgico impacta directamente en la cantidad de metal recuperado.

- **Costos de Procesamiento y Fundición:**

Incluyen costos de molienda, flotación, lixiviación y refinación, que afectan la rentabilidad del mineral.

- **Penalizaciones por Impurezas:**

Algunos elementos presentes en el mineral pueden generar sobrecostos debido a su impacto en el proceso de refinación.

- **Precios de los Metales:**

La variación en los precios del mercado tiene un impacto directo en el NSR.

3.3.2.1 Ley de mineral. La ley del mineral es la concentración de metal valioso dentro de una tonelada de material extraído. Se expresa comúnmente en:

Porcentaje (%) para metales como zinc, plomo, cobre, etc.

Gramos por tonelada (g/t) para metales preciosos como plata y oro.

Una mayor ley implica mayor contenido de metal recuperable, aumentando el NSR.

Sin embargo, en yacimientos de baja ley, la rentabilidad dependerá de la recuperación metalúrgica y costos operativos.

3.3.2.2 Recuperación metalúrgica. La recuperación metalúrgica representa el porcentaje del metal contenido en el mineral que es recuperado a través del proceso de concentración y refinación. Se calcula como:

$$Recuperacion(\%) = \frac{Metal\ Recuperado}{Metal\ Contenido} * 100 \quad (2)$$

Factores que afectan la recuperación:

- Tipo de mineral y su mineralogía.
- Tipo de proceso metalúrgico utilizado (flotación, lixiviación, fundición, etc.)

- Eficiencia de los reactivos y condiciones operativas.

3.3.2.3 Costos de procesamiento y fundición. Estos costos incluyen:

- Molienda y flotación: Energía, reactivos químicos y mano de obra
- Lixiviación: Consumo de ácido, cianuro o reactivos específicos
- Fundición y refinación: Costos adicionales si el metal no puede venderse directamente como concentrado

Estos costos deben restarse del valor bruto del metal para obtener el NSR real.

3.3.2.4 Penalidades por Impurezas. Las penalidades se aplican cuando el mineral contiene elementos no deseados que afectan el proceso de refinación. Ejemplos incluyen:

- Arsénico (As) en concentrados de cobre
- Mercurio (Hg) en oro
- Fluoruros y cloruros en ciertos minerales

Las penalidades pueden reducir significativamente el NSR si los niveles de impureza superan los límites aceptados por las fundiciones.

3.3.2.5 Precios de los metales. El precio de los metales es un factor clave en la determinación del NSR, ya que varía según la oferta y demanda del mercado global. Las fuentes principales de precios son:

- London Metal Exchange (LME) para metales industriales
- London Bullion Market Association (LBMA) para oro y plata
- Platts y Fastmarkets para otros metales estratégicos

Las variaciones de precios pueden hacer que un yacimiento sea rentable o no.

3.3.2.6 Fórmulas y metodologías para el Cálculo del NSR. El cálculo del NSR depende del tipo de mineral tratado y del proceso metalúrgico aplicado. Los enfoques más utilizados incluyen:

Modelo de NSR Unitario:

$$NSR_{unitario} = (Precio_{metal} * Ley_{metal} * Recuperacion_{metal}) - Costos \quad (3)$$

NSR por tonelada de mineral:

$$NSR_{ton} = \sum \left(\frac{Metal\ Pagadero * Precio}{Costo_{total}} \right) \quad (4)$$

Modelo polimetálico:

Para yacimientos con varios metales, se suma el NSR de cada uno ponderado por su contribución en el concentrado final.

3.3.2.7 Fórmula General del NSR. El cálculo general del NSR se expresa como:

$$NSR = \sum [(Precio_{met} Ley_{met} Recup_{met} Factor_{pago}) - Costos_{fund} - Penalidades] \quad (5)$$

Donde:

$Factor_{pago}$ = Porcentaje del metal pagadero por la fundición (ej. 95% para el cobre en concentrados).

$Costos_{fund}$ = Costos de fundición y refinación por tonelada de concentrado.

$Penalidades$ = Costos adicionales por impurezas.

Este modelo permite determinar la rentabilidad del mineral y su impacto en la planificación minera.

3.3.3 Base de datos y supuestos

3.3.3.1 Caracterización del yacimiento y composición mineralógica. La Unidad Minera Ticlio continúa desarrollando labores subterráneas en la Zona Oeste (que comprende las estructuras de Veta Ramal techo, Cuerpo Reemplazamiento y otras). Actualmente, la extracción promedio de mineral de la mina es de 1,050 tms/día, proveniente de tajeos y avances en mineral. El minado es mediante los métodos de explotación de corte y relleno ascendente (Breasting), mediante Bench and Fill con taladros largos y el método SARC. La ley de cabeza promedio para el año 2025 es de 1.34 Oz Ag, 0.20% Cu, 0.82% Pb y 7.06% Zn.

3.3.3.2 Datos de leyes y recuperaciones metalúrgicas

Tabla 9

Balance metalúrgico

PRODUCTO	PRODUCCIÓN TMS	% PESO	ENSAYOS					RECUPERACIONES %			
			% Cu	% Pb	% Zn	gr/t Ag	Onz/t Ag	Cu	Pb	Zn	Ag
Cabeza	380,543.59	100.00	0.39	0.72	5.45	80.61	2.59	100.00	100.00	100.00	96.06
Conc. Cobre	4,047.21	1.06	28.46	7.32	2.01	2,665.96	85.71	77.27	10.78	0.39	33.79
Conc. Plomo	3,929.28	1.03	2.35	53.72	8.47	2,921.30	93.92	6.19	76.74	1.61	35.95
Conc. Zinc	37,497.40	9.85	0.54	0.52	52.84	159.88	5.14	13.54	7.06	95.59	18.77
Relaves	335,069.69	89.11	0.02	0.07	0.18	10.95	0.35	5.14	8.09	2.89	11.49
Cab. Calcul.	380,543.59	101.06	0.40	0.74	5.47	83.91	2.70	102.14	102.67	100.47	100.00
Indeterminados			0.09	0.21	0.28	3.30	1.15	2.14	2.67	0.47	3.94

Fuente: Cía. Minera Volcan

3.3.3.3 Precios de los metales (Históricos y proyección)

Tabla 10

Proyección del precio de los metales

PRECIOS	2025	2026	2027	2028	2029	PRECIOS A LARGO PLAZO	SELECCIONADO
Zn (USD/TM)	2700	2750	2850	2950	2750	2750	2750
Pb (USD/TM)	2150	2175	2200	2225	2150	2150	2150
Cu (USD/TM)	9000	9200	9400	9600	9400	9400	9400
Ag (USD/Oz)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	22.26
Au (USD/Oz)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Fuente: Cía. Minera Volcan

3.3.3.4 Costos de procesamiento, transporte y comercialización

Tabla 11

Precios y costos de tratamiento para concentrado de Zn

	UNIDADES	2025	2026	2027	2028	LARGO PLAZO	SELECCIONADO
Cargos por tratamiento de concentrado de Zn	US\$/dmt	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0	143.0
Cargos escaladores de precio de Zn	US\$/dmt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Deducible mínimo de Zn	%	Min btw 85% & - 8%	Min btw 85% & - 8%	Min btw 85% & - 8%	Min btw 85% & - 8%	Min btw 85% & - 8%	Min btw 85% & - 8%
Deducción mínima de Au	Gr/%	-	-	-	-	-	-
Deducción mínima de Ag	Oz/%	-3 oz * 70%	-3 oz * 70%	-3 oz * 70%	-3 oz * 70%	-3 oz * 70%	-3 oz * 70%
Gastos de venta	US\$/dmt	94.1	94.1	94.1	94.1	94.1	94.1
Cargo de refinación de Ag	US\$/Oz	-	-	-	-	-	-
Cargo de refinación de Au	US\$/Oz	-	-	-	-	-	-
Penalidades esperadas	US\$/dmt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 12*Precios y costos de tratamiento para concentrado de Pb*

	UNIDADES	2025	2026	2027	2028	LARGO PLAZO	SELECCIONADO
Cargos por tratamiento de concentrado de Pb	US\$/dmt	74.9	74.9	74.9	74.9	74.9	74.9
Cargos escaladores de precio de Pb	US\$/dmt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Deducible mínimo de Pb	%	Min btw 95% & -3%	Min btw 95% & -3%	Min btw 95% & -3%	Min btw 95% & -3%	Min btw 95% & -3%	Min btw 95% & -3%
Deducción mínima de Au	Gr/%	Min btw 95% & -1gr	Min btw 95% & -1gr	Min btw 95% & -1gr	Min btw 95% & -1gr	Min btw 95% & -1gr	Min btw 95% & -1gr
Deducción mínima de Ag	Oz/%	Min btw 95% & -1.61 Oz	Min btw 95% & -1.61 Oz	Min btw 95% & -1.61 Oz	Min btw 95% & -1.61 Oz	Min btw 95% & -1.61 Oz	Min btw 95% & -1.61 Oz
Deducible mínimo de Cu	%	30% above 2%	30% above 2%	30% above 2%	30% above 2%	30% above 2%	30% above 2%
Gastos de venta	US\$/dmt	62.1	62.1	62.1	62.1	62.1	62.1
Cargo de refinación de Ag	US\$/Oz	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
Cargo de refinación de Au	US\$/Oz	15	15	15	15	15	15
Penalizaciones esperadas	US\$/dmt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 13*Precios y costos de tratamiento para concentrado de Cu*

	UNIDADES	2025	2026	2027	2028	LARGO PLAZO	SELECCIONADO
Cargos por tratamiento de concentrado de Cu	US\$/dmt	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0	50.0
Cargos escaladores de precio de Cu	US\$/dmt	0	0	0	0	0	0
Deducible mínimo de Cu	%	Min btw 96.5% & -1%	Min btw 96.5% & -1%	Min btw 96.5% & -1%	Min btw 96.5% & -1%	Min btw 96.5% & -1%	Min btw 96.5% & -1%
Deducción mínima de Au	Gr/%	Min btw 90% & 1 gr	Min btw 90% & 1 gr	Min btw 90% & 1 gr	Min btw 90% & 1 gr	Min btw 90% & 1 gr	Min btw 90% & 1 gr
Deducción mínima de Ag	Oz/%	92%	92%	92%	92%	92%	92%
Gastos de venta	US\$/dmt	65.3	65.3	65.3	65.3	65.3	65.3
Cargo de refinación de Ag	US\$/Oz	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Cargo de refinación de Au	US\$/Oz	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Cargo de refinación de Cu	US\$/dmt	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Penalidades esperadas	US\$/dmt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fuente: Cía. Minera Volcan

3.3.4 Metodología del cálculo de NSR

Tabla 14

Precio de las commodities

	UNIDADES	VALOR
Precio Zn	US\$/toda	\$2,750
Precio Pb	US\$/tmd	\$2,150
Precio Cu	US\$/tmd	\$9,400
Precio Ag	USD/oz	\$22.26
Precio Au	USD/oz	\$2,000

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 15

Leyes de balance

	UNIDADES	VALOR
Toneladas de Mineral Tratado	t	380,544
Ley de Zn en Mineral Tratado	%	5.45%
Ley de Pb en Mineral Tratado	%	0.72%
Ley de Cu en Mineral Tratado	%	0.39%
Ley de Ag en Mineral Tratado	Oz/t	2.61
Ley de Au en Mineral Tratado	Oz/t	0.0071
Cont. Met. de Zn en Mineral Tratado	t	20,726
Cont. Met. de Pb en Mineral Tratado	t	2,750
Cont. Met. de Cu en Mineral Tratado	t	1,490
Cont. Met. de Ag en Mineral Tratado	Oz	994,114
Cont. Met. de Au en Mineral Tratado	Oz	2,688

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 16

Cálculo de NSR de Zn en concentrado de Zn

Zn en Zn Concentrado	UNIDADES	VALOR
Humedad	%	0.00%
Zn Rec en Zn Conc	%	95.59%
Zn Conc Prod	DMT	37,497
Zn Cont en Zn Conc	T	19,812
Ley Zn en Zn Conc	%	52.84%
Deducible Zn en Zn Conc	%	-8.00%
Deducible Zn en Zn Conc	%	85.00%
Min Deducible (Ley Zn en Zn Conc)	%	44.84%
Zn Pagable en Zn Conc	T	16,812
Valor, Acct Zn in Zn Conc	US\$/DMT	\$1,233
Base Zn Treatment Charge	US\$/DMT	\$142.97
Zn Price Escalator Charge	US\$/DMT	\$0.00
Penalties	US\$/DMT	\$0.00
Total Treatment Charges	US\$/DMT	\$142.97
Net Invoice Value	US\$/DMT	\$1,090.00
Selling Expenses	US\$/DMT	\$94.13
Net Smelter Return	US\$/DMT	\$995.87
Royalty	%	0.0%
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$995.87
Ratio Concentración Zn	t/DMT	10.15
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$98.13

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 17*Cálculo de NSR de Ag en concentrado de Zn*

Ag en Zn Concentrado	UNIDADES	VALOR
Ag Rec en Zn Conc	%	19.39%
Zn Conc Prod	DMT	37,497
Ag Contd en Zn Conc	Oz	192,746
Ley, Ag en Zn Conc	Oz/DMT	5.14
Deducible, Ag en Zn Conc	Oz/DMT	-3.00
Deducible, Ag en Zn Conc	%	70%
Deducible Total (Ley Ag en Zn Conc)	Oz/DMT	1.50
Ag Pagable en Zn Conc	OZ	56,178
Valor, Ag en Zn Conc	US\$/DMT	\$33.35
Cargo de Refining / oz	US\$/OZ	-
Ag Refining Charge	US\$/DMT	\$0.00
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$33.35
Ratio Concentración Ag en Zn	t/DMT	10.15
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$3.29

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 18*Cálculo de NSR de Pb en concentrado de Pb*

Pb en Pb Concentrado	UNIDADES	VALOR
Humedad	%	0.00%
Pb Rec en Pb Conc	%	76.74%
Pb Conc Prod	DMT	3,929
Pb Cont en Pb Conc	T	2,111
Ley Pb en Pb Conc	%	53.72%
Deducible Pb en Pb Conc	%	-3.00%
Deducible Pb en Pb Conc	%	95.00%
Min Deducible (Ley Pb en Pb Conc)	%	50.72%
Pb Pagable en Pb Conc	T	1,993
Valor, Acct Pb in Pb Conc	US\$/DMT	\$1,090
Base Pb Treatment Charge	US\$/DMT	\$74.90
Pb Price Escalator Charge	US\$/DMT	\$0.00
Penalties	US\$/DMT	\$0.00
Total Treatment Charges	US\$/DMT	\$74.90
Net Invoice Value	US\$/DMT	\$1,015.50
Selling Expenses	US\$/DMT	\$62.07
Net Smelter Return	US\$/DMT	\$953.43
Royalty	%	0.0%
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$953.43
Ratio Concentración Pb	t/DMT	96.85
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$9.84

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 19*Cálculo de NSR de Ag en concentrado de Pb*

Ag en Pb Concentrado	UNIDADES	VALOR
Ag Rec en Pb Conc	%	0.00%
Pb Conc Prod	%	76.74%
Ag Contd en Pb Conc	DMT	3,929
Ley, Ag en Pb Conc	T	2,111
Deducible, Ag en Pb Conc	%	53.72%
Deducible, Ag en Pb Conc	%	-3.00%
Min. Deducible (Ley Ag en Pb Conc)	%	95.00%
Ag Pagable en Pb Conc	%	50.72%
Valor, Ag en Pb Conc	T	1,993
Cargo de Refining / oz	US\$/DMT	\$1,090
Ag Refining Charge	US\$/DMT	\$74.90
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$0.00
Ratio Concentración Ag en Pb	US\$/DMT	\$0.00
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/DMT	\$74.90

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 20*Cálculo de NSR de Au en concentrado de Pb*

Au en Pb Concentrado	UNIDADES	VALOR
Au Rec en Pb Conc	%	12.22%
Pb Conc Prod	DMT	3,929
Au Contd en Pb Conc	Oz	328
Ley, Au en Pb Conc	Oz/DMT	0.08
Deducible, Au en Pb Conc	Oz/DMT	-0.03
Deducible, Au en Pb Conc	%	95%
Min. Deducible (Ley Au en Pb Conc)	Oz/DMT	0.05
Au Pagable en Pb Conc	OZ	202
Valor, Au en Pb Conc	US\$/DMT	\$103
Cargo de Refining / oz	US\$/OZ	\$15.00
Au Refining Charge	US\$/DMT	\$0.77
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$102.07
Ratio Concentración Ag en Pb	t/DMT	96.85
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$1.05

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 21*Cálculo de NSR de Cu en concentrado de Cu*

Cu en Cu Concentrado	UNIDADES	VALOR
Humedad	%	0.00%
Cu Rec en Cu Conc	%	77.27%
Cu Conc Prod	DMT	4,047
Cu Cont en Cu Conc	T	1,152
Ley Cu en Cu Conc	%	28.46%
Deducible Cu en Cu Conc	%	-1.00%
Deducible Cu en Cu Conc	%	96.50%
Min Deducible (Ley Cu en Cu Conc)	%	27.46%
Cu Pagable en Cu Conc	T	1,111
Cu Refining Charge (Precio)	US\$/tmd	\$110.23
Valor, Acct Cu in Cu Conc	US\$/DMT	\$2,551
Base Cu Treatment Charge	US\$/DMT	\$50.00
Cu Price Escalator Charge	US\$/DMT	\$0.00
Penalties	US\$/DMT	\$0.00
Total Treatment Charges	US\$/DMT	\$50.00
Net Invoice Value	US\$/DMT	\$2,500.64
Selling Expenses	US\$/DMT	\$65.33
Net Smelter Return	US\$/DMT	\$2,435.31
Royalty	%	0.0%
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$2,435.31
Ratio Concentración Cu	t/DMT	94.03
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$25.90

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 22*Cálculo de NSR de Ag en concentrado de Cu*

Ag en Cu Concentrado	UNIDADES	VALOR
Ag Rec en Cu Conc	%	34.90%
Cu Conc Prod	DMT	4,047
Ag Contd en Cu Conc	Oz	346,896
Ley, Ag en Zn Conc	Oz/DMT	85.71
Deducible, Ag en Cu Conc	Oz/DMT	0.00
Deducible, Ag en Cu Conc	%	92%
Min. Deducible (Ley Ag en Cu Conc)	Oz/DMT	78.86
Ag Pagable en Cu Conc	OZ	319,145
Valor, Ag en Cu Conc	US\$/DMT	\$1,755
Cargo de Refining / oz	US\$/OZ	\$0.50
Ag Refining Charge	US\$/DMT	\$39.43
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$1,715.90
Ratio Concentración Ag en Cu	t/DMT	94.03
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$18.25

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 23*Cálculo de NSR de Au en concentrado de Cu*

Au en Cu Concentrado	UNIDADES	VALOR
Au Rec en Cu Conc	%	41.39%
Cu Conc Prod	DMT	4,047
Au Contd en Cu Conc	Oz	1,113
Ley, Au en Cu Conc	Oz/DMT	0.27
Deducible, Au en Cu Conc	Oz/DMT	-0.03
Deducible, Au en Cu Conc	%	90%
Min. Deducible (Ley Au en Cu Conc)	Oz/DMT	0.24
Au Pagable en Cu Conc	OZ	983
Valor, Au en Cu Conc	US\$/DMT	\$486
Cargo de Refining / oz	US\$/OZ	\$5.00
Au Refining Charge	US\$/DMT	\$1.21
Net Smelter Return, FOB Conc	US\$/DMT	\$484.35
Ratio Concentración Ag en Cu	t/DMT	94.03
NSR, FOB Mineral Cabeza	US\$/t	\$5.15

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 24*Resumen de NSR – FOB de mina*

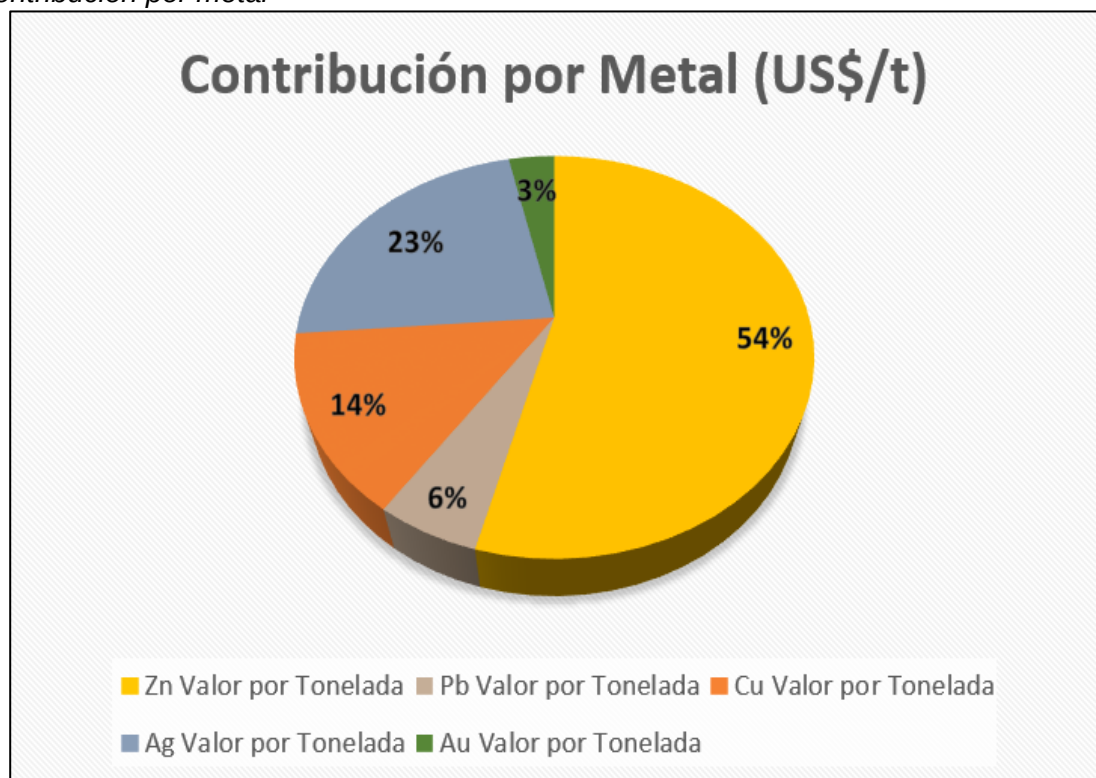
	UNIDADES	VALOR
Zn en Zn Concentrado	US\$/t	\$98.13
Ag in Zn Concentrado	US\$/t	\$3.29
Zn Concentrado	US\$/t	\$101.42
Pb en Pb Concentrado	US\$/t	\$9.84
Ag in Pb Concentrado	US\$/t	\$19.96
Au in Pb Concentrado	US\$/t	\$1.05
Pb Concentrado	US\$/t	\$30.85
Cu en Cu Concentrado	US\$/t	\$25.90
Ag en Cu Concentrado	US\$/t	\$18.25
Au en Cu Concentrado	US\$/t	\$5.15
Cu Concentrado	US\$/t	\$49.30
Total (US\$)	US\$/t	\$181.6

Fuente: Elaboración propia

Tabla 25*NSR por unidad de mineral*

	UNIDADES	VALOR
Zn	US\$/%/t	\$18.02
Pb	US\$/%/t	\$13.62
Cu	US\$/%/t	\$66.13
Ag	US\$/Oz/t	\$15.88
Au	US\$/Oz/t	\$878.39
Total (US\$)	US\$/t	\$181.6

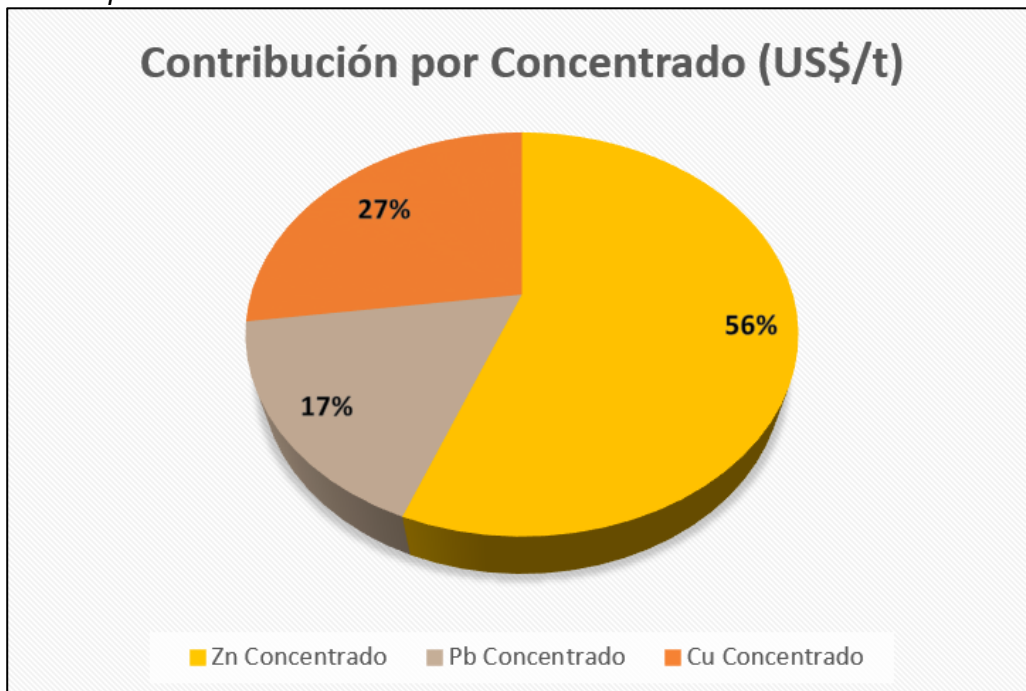
Fuente: Elaboración propia

Figura 17*Contribución por metal*

Fuente: Elaboración propia

Figura 18

Contribución por concentrado



Fuente: Elaboración propia

3.4 Planificación minera

Las operaciones de la Unidad Minera Ticlio han experimentado una evolución significativa, manteniendo el minado subterráneo como su principal actividad. Para acceder a las diferentes labores subterráneas, se utilizan varias infraestructuras clave:

- **Túnel Galera:** Con 700 metros de longitud y una sección de 5.0 m x 5.0 m, este túnel permite el acceso a la Zona Alta y la Profundización, y se utiliza principalmente para la extracción de mineral.
- **Rampa Ticlio:** Continúa desde el Túnel Galera, permitiendo el acceso a los niveles inferiores, hasta llegar al Nivel 07 en la Zona Oeste.
- **Rp_574:** Conecta el Nivel 07 con el Nivel 11.
- **RP_275:** Extiende la conexión desde el Nivel 11 hasta el Nivel 16.
- **Ruta alterna:** A partir del Nivel 11, la RP_576 conecta con el BP_771, que a su vez enlaza con la RP_713. Finalmente, la RP_714 se integra a la RP_Ticlio, asegurando la conexión con la vía principal de transporte.

Es importante destacar que los niveles operativos están separados verticalmente por una diferencia de 50 metros entre cada uno, lo que permite una mayor eficiencia en las operaciones mineras.

La explotación se ha centrado en la Zona Oeste, que abarca la sección de caliza hacia la profundización de la RP_275. En esta zona se han desarrollado subniveles de explotación, optimizando así las operaciones. Dentro de la Zona Oeste, destacan dos estructuras principales:

- **Veta Ramal Techo:**

Esta veta se encuentra entre los niveles 13 y 16, y se accede a través del Túnel Galera y la Rampa Ticlio. Desde allí, se continúa por la RP_275 para realizar las operaciones de minado mediante el método de corte y relleno ascendente.

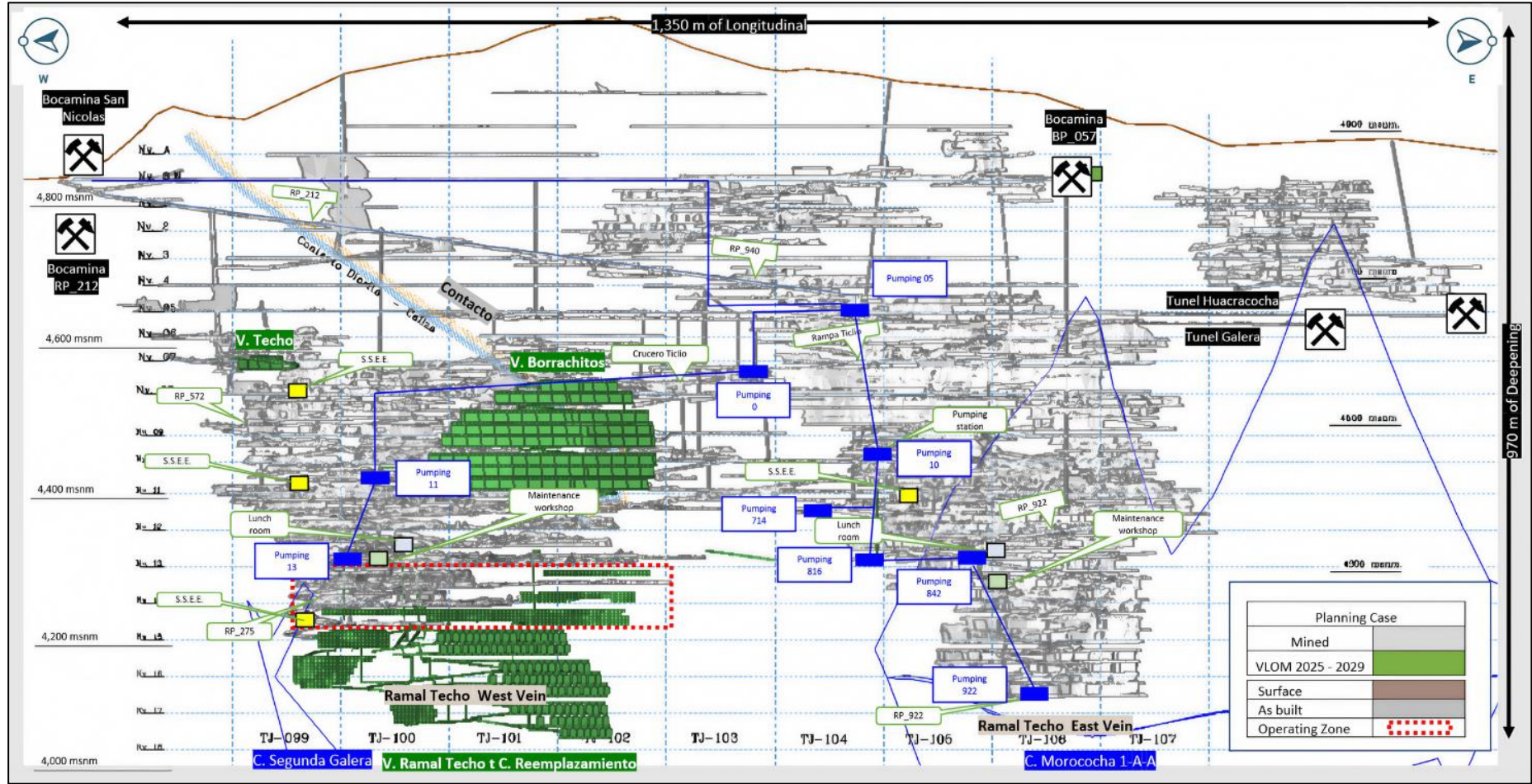
- **Cuerpo Reemplazamiento:**

Este cuerpo se encuentra en la caja piso y techo de la Veta Ramal Techo, y se minará en conjunto desde el Nivel 13 hasta el Nivel 16, maximizando la extracción de mineral en la zona.

La configuración de estas infraestructuras y la concentración de las operaciones en la Zona Oeste permiten una explotación más eficiente y racional de los recursos mineros.

Figura 19

Vista general de la mina – sección longitudinal



Fuente: Cía. Minera Volcan

3.4.1 Métodos de Minado Subterráneo

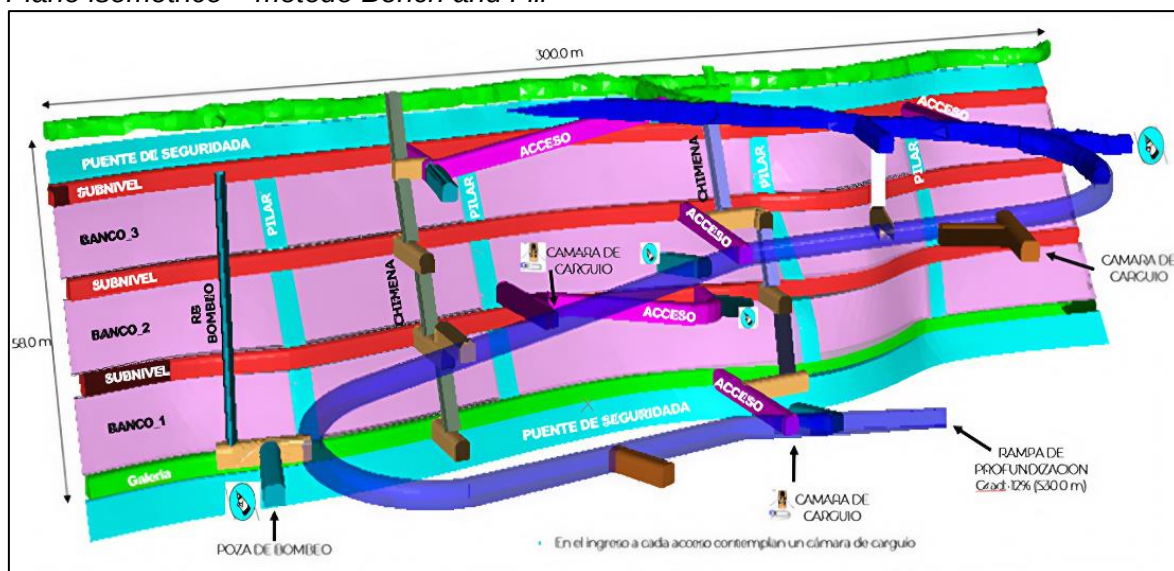
Los métodos de explotación en la mina se eligen según las características de las estructuras mineralizadas. Los más utilizados son el corte y relleno ascendente, el método Bench and Fill (B&F), y el método SARC, dependiendo de la calidad del macizo rocoso y la evaluación económica.

3.4.1.1 Método Bench and Fill. Es una variante del Taladros Largos, que mejora la productividad y reduce costos. Se aplica en vetas con buzamientos mayores a 50° y macizos rocosos de calidad regular a mala, con un $RMR > 30$, especialmente en la caja techo para evitar desprendimientos. Este método tiene una dilución promedio del 11%.

Para preparar los tajos con este método, se construye una rampa de profundización (-12%) con sección de 4.20 m x 4.00 m. Desde la rampa, se generan accesos de 35 a 55 m hacia la estructura, con una sección de 3.50 m x 4.00 m. A medida que se avanza, se construyen infraestructuras como cámaras de carguío, pozas de bombeo, refugios, y subestaciones. El tajo de explotación tiene 300 m de longitud y 58 m de altura.

Figura 20: Plano isométrico – método Bench and Fill

Plano isométrico – método Bench and Fill



Fuente: Cía. Minera Volcan

El minado se realiza en retirada, desde los extremos hacia el centro, con relleno detrítico iniciado también desde los extremos. Los bancos de explotación tienen 12 m de altura. Para la limpieza y extracción se usan scoops diésel con capacidad de 4.0 y 6.0 yd^3 ,

y volquetes de 25 t para transportar el mineral. El relleno detrítico, proveniente de los avances y preparaciones, se utiliza para continuar el ciclo de minado.

3.4.1.2 Método de explotación corte y relleno ascendente (Over Cut and Fill). Este método de explotación se utiliza en vetas con buzamientos menores a 50°. La preparación de los tajos comienza con una rampa de profundización de -12% y una sección de 4.20 m x 4.00 m. Desde esta rampa, se genera un By Pass a lo largo de la estructura mineralizada, que se extiende hasta 75 m. A partir de ahí, se crean accesos con una longitud de 75 m y una sección de 3.50 m x 4.00 m, con un gradiente horizontal. Al completar la labor de acceso, se inicia la galería con una sección de 4.00 m x 4.00 m.

Durante el desarrollo de la rampa, se construyen diversas infraestructuras, como cámaras de carguío, pozas de bombeo, refugios, y subestaciones. El bloque de explotación tiene una dimensión de 510 m de longitud y 20 m de altura, y se preparan tres accesos para facilitar la operación.

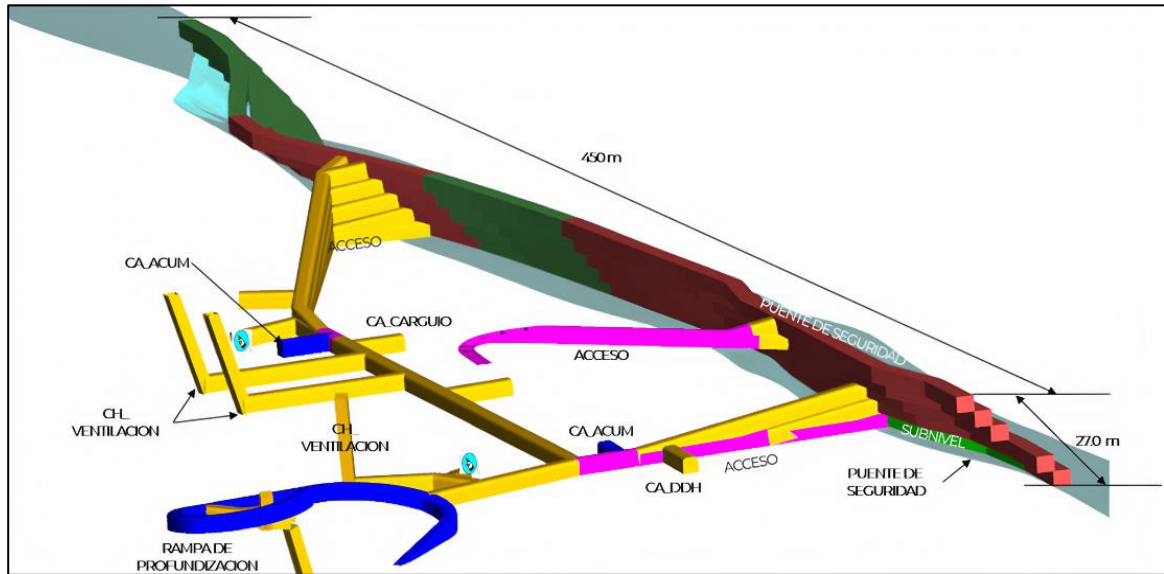
El minado del tajo se realiza en retirada desde la galería hacia el acceso negativo, dejando una luz de 0.5 m en la corona de la galería. Una vez que se completa el relleno detrítico, se realiza el acceso, y este se convierte en el nuevo piso de explotación. El primer corte de minería se realiza encima de la galería, con una altura de 4 m por bancada, y el proceso se repite hasta que el acceso, inicialmente con un gradiente de -15%, alcance un gradiente de +15%.

Para la limpieza y extracción del mineral se utilizan scoops diésel de 6.0 yd³ de capacidad, y el mineral extraído se transporta mediante volquetes de 25 tn hacia la cancha de mineral en la superficie. Al finalizar la limpieza, el relleno detrítico proveniente de los avances y preparaciones se utiliza para continuar el ciclo de minado.

Cada tajeo consta de 5 cortes de 4 m de altura y 75 m de longitud, y el acceso inicial tiene un gradiente del 0.5%. Los accesos siguientes se ajustan gradualmente hasta alcanzar un gradiente de +15%.

Figura 21

Plano isométrico – método Over Cut and Fill



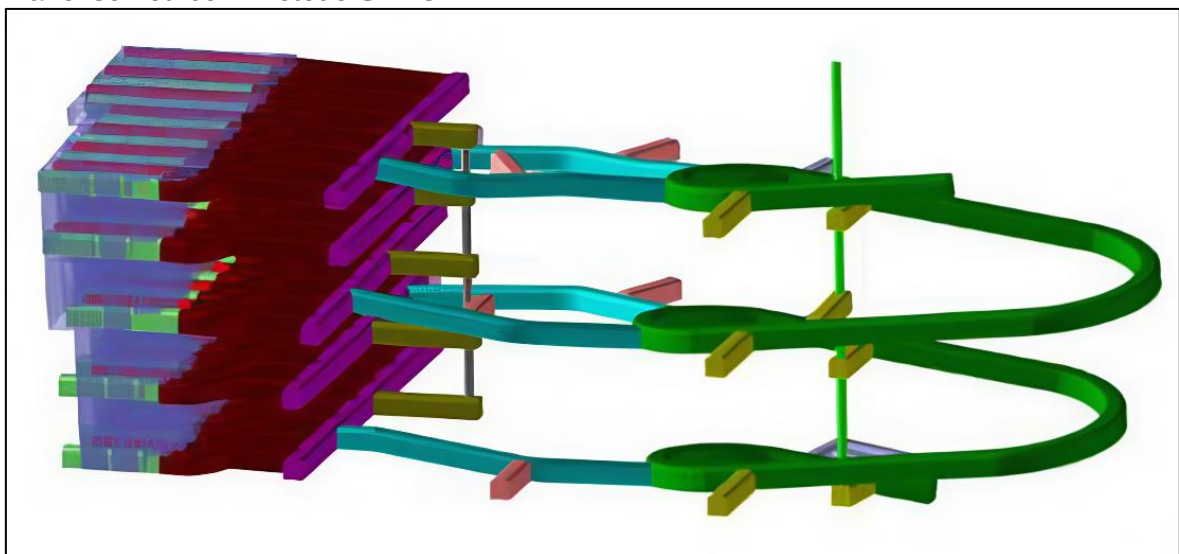
Fuente: Cía. Minera Volcan

3.4.1.3 Método de Taladros largos en secciones transversales (SARC).

El Método de Explotación SARC (Subniveles Ascendentes con Relleno Consolidado) se aplica en estructuras con buzamiento superior a 50° y un RMR entre 40-55, con un factor de dilución promedio del 7%. La preparación comienza con una rampa de -12% que dirige el avance hacia un By Pass paralelo a la estructura, generando cámaras operativas transversales.

Figura 22

Plano isométrico – método SARC



Fuente: Cía. Minera Volcan

La explotación requiere un subnivel base de extracción y uno superior para perforación. La carga disparada cae por gravedad al subnivel inferior, donde es evacuada a cámaras de acumulación mediante equipos de bajo perfil. El relleno cementado se usa en los tajos primarios y el relleno detrítico en los secundarios.

El diseño incluye cámaras de acumulación de mineral y, alternativamente, una chimenea Ore Pass para mejorar la dinamización de la explotación.

Los parámetros de diseño para la explotación con el método SARC se definieron considerando estudios geomecánicos, las dimensiones de los equipos, y la optimización de la preparación y desarrollo. Para las labores principales de desarrollo (rampas y By Pass), se estableció una sección estándar de 4.2 m x 4.0 m. Para los accesos y cámaras, se adoptó una sección de 4.0 m x 4.0 m. En cuanto a las labores de explotación, tanto para las cámaras primarias como secundarias de los subniveles, también se consideró una sección de 4.0 m x 4.0 m.

3.4.2 Programa de producción

- El plan de producción del año 2025 es de 379,491 tms, con una producción por día de 1,040 tms.
- El plan de producción por método de explotación: taladros largos es el 1% (4,444 tms), corte & relleno ascendente es el 74% (281,468 tms), SARC es el 12% (43,643 tms) y en avances es el 13 % (49,936 tms).
- La estructura de mayor incidencia en la producción es la Veta Ramal Techo con el 84.5% (317,585 tms).

Tabla 26

Programa de producción por método de explotación

MÉTODO DE MINADO	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	TOTAL GENERAL 2025
SN													
TMS	-	-	1,252	2,497	1,397	2,532	5,243	4,586	9,728	9,169	5,925	7,607	49,936
Zn (%)	-	-	1.46	3.46	3.86	4.32	5.18	5.51	6.29	6.04	6.43	6.54	5.68
Pb (%)	-	-	0.57	0.67	0.22	0.39	0.96	0.39	0.45	0.52	0.67	0.61	0.57
Cu (%)	-	-	0.06	0.12	0.19	0.33	0.24	0.19	0.25	0.27	0.19	0.19	0.22
Ag (oz)	-	-	0.54	0.62	1.24	1.80	1.11	0.94	1.49	1.48	1.32	1.28	1.29
VPT (USD/t)	-	-	48.05	91.44	112.32	144.69	148.07	137.28	170.53	171.48	170.69	169.76	155.23
OCF													
TMS	29,038	29,152	30,879	28,873	30,734	28,553	27,010	22,154	14,177	16,763	14,349	9,786	281,468
Zn (%)	7.08	7.09	7.28	7.52	7.21	7.32	7.30	7.51	8.74	7.77	7.79	7.47	7.42
Pb (%)	1.02	1.13	0.68	0.92	0.91	0.87	0.57	0.84	1.00	0.70	1.38	1.27	0.91
Cu (%)	0.18	0.24	0.15	0.17	0.22	0.17	0.13	0.17	0.28	0.23	0.23	0.16	0.19
Ag (oz)	1.39	1.59	1.02	1.35	1.38	1.13	0.91	1.05	2.10	1.41	1.37	2.00	1.32
VPT (USD/t)	179.77	189.35	170.10	185.16	183.28	176.67	164.96	177.88	229.56	191.22	200.26	200.58	183.71
SLS													
TMS	-	-	-	-	-	-	-	3,416	1,028	-	-	-	4,444
Zn (%)	-	-	-	-	-	-	-	4.35	5.39	-	-	-	9.74
Pb (%)	-	-	-	-	-	-	-	2.01	1.91	-	-	-	3.91
Cu (%)	-	-	-	-	-	-	-	0.15	0.26	-	-	-	0.41
Ag (oz)	-	-	-	-	-	-	-	0.94	1.19	-	-	-	2.13
VPT (USD/t)	-	-	-	-	-	-	-	133.42	163.04	-	-	-	296.46
SARC													
TMS	-	-	-	-	-	-	-	2,020	6,202	6,370	11,091	17,959	43,643
Zn (%)	-	-	-	-	-	-	-	6.38	5.02	6.77	6.57	7.15	6.61
Pb (%)	-	-	-	-	-	-	-	0.51	0.37	0.64	0.54	0.35	0.45
Cu (%)	-	-	-	-	-	-	-	0.15	0.16	0.24	0.29	0.28	0.25
Ag (oz)	-	-	-	-	-	-	-	1.03	0.99	1.36	1.69	1.72	1.52
VPT (USD/t)	-	-	-	-	-	-	-	151.53	124.54	172.69	177.15	184.58	170.89

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 27

Plan de producción total

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL GENERAL 2025
TMS	29,038	29,152	32,131	31,370	32,131	31,085	32,253	32,176	31,135	32,303	31,365	35,352	379,491
Zn (%)	7.08	7.09	7.06	7.19	7.07	7.07	6.96	6.82	7.12	7.08	7.10	7.11	7.12
Pb (%)	1.02	1.13	0.68	0.90	0.88	0.83	0.64	0.88	0.73	0.64	0.95	0.66	0.84
Cu (%)	0.18	0.24	0.15	0.17	0.22	0.19	0.14	0.17	0.25	0.24	0.24	0.23	0.20
Ag (oz/t)	1.39	1.59	1.00	1.30	1.37	1.19	0.94	1.02	1.66	1.42	1.48	1.70	1.35
VPT (\$/t)	179.77	189.35	165.34	177.70	180.19	174.07	162.21	165.72	188.00	181.96	186.50	185.82	179.81

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 28

Plan del balance metalúrgico

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL GENERAL 2025
Tratamiento													
TMS	29,038	29,152	32,131	31,370	32,131	31,085	32,253	32,176	31,135	32,303	31,365	35,352	379,491
Leyes													
Zn (%)	7.08	7.09	7.06	7.19	7.07	7.07	6.96	6.82	7.12	7.08	7.10	7.11	7.12
Pb (%)	1.02	1.13	0.68	0.90	0.88	0.83	0.64	0.88	0.73	0.64	0.95	0.66	0.84
Cu (%)	0.18	0.24	0.15	0.17	0.22	0.19	0.14	0.17	0.25	0.24	0.24	0.23	0.20
Ag (oz/t)	1.39	1.59	1.00	1.30	1.37	1.19	0.94	1.02	1.66	1.42	1.48	1.70	1.35
Zinc (%)	95%	95%	95%	96%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%	95%
Plomo (%)	84%	85%	71%	83%	82%	81%	68%	82%	71%	68%	84%	69%	77%
Cobre (%)	55%	66%	51%	53%	61%	54%	48%	53%	67%	67%	67%	65%	59%
Plata (oz/t)	0.81	0.82	0.78	0.81	0.82	0.80	0.76	0.79	0.80	0.81	0.82	0.83	0.80
Concentrados													
Zinc (TMS)	3,847	3,868	4,232	4,234	4,248	4,112	4,188	4,096	4,148	4,279	4,165	4,701	50,117
Plomo (TMS)	459	518	315	444	446	409	290	448	324	292	469	333	4,747
Cobre (TMS)	144	193	129	140	207	157	118	143	215	219	213	217	2,094
Finos													
Zinc (TMS)	1,962	1,973	2,159	2,159	2,166	2,097	2,136	2,089	2,115	2,182	2,124	2,397	25,560
Plomo (TMS)	248	280	155	235	232	209	139	233	162	140	249	160	2,441
Cobre (TMS)	29	46	24	28	44	31	22	29	52	52	51	52	461
Plata (TMS)	32,599	37,926	25,016	32,712	35,989	29,360	22,949	25,979	41,202	37,286	37,712	49,609	408,339

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 29*Plan de avances lineales*

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL GENERAL 2025
Desarrollo (m)	238	320	243	175	172	149	110	111	70	87	104	69	1,848
Preparación (m)	67	83	85	90	70	35	42	-	-	-	-	-	472
Explotación (m)	95	5	71	157	157	170	189	254	306	284	236	259	2,185
Avance horizontal	400	408	399	421	399	355	341	365	376	372	340	329	4,505
Desarrollo vertical	-	-	6	7	19	56	72	38	30	32	49	47	356
Metros total	400	408	405	428	418	411	413	403	406	404	389	375	4,860

Fuente: Cía. Minera Volcan

Tabla 30*Plan de balance de masas*

	UNIDAD	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
M³ de desmonte generados	M³	7,545	9,520	9,273	8,487	6,861	5,929	7,462	6,221	5,214	4,438	5,602	5,747	82,299
M³ de vacíos generados	M³	6,673	8,669	9,214	9,169	6,365	6,814	7,467	4,828	3,596	3,524	3,364	4,512	74,196
Movimiento a superficie	M³	872	851	59	-683	496	-885	-4	1,392	1,618	914	2,238	1,235	8,103

Fuente: Cía. Minera Volcan

3.5 Evaluación del impacto del riesgo en la planificación

3.5.1 Hill of Value HoV

3.5.1.1 Objetivos. Realizar una visión estratégica que pueda ser realizable en el Mediano y Largo Plazo, que esté basado en la realidad actual de cada mina donde se pueda implementar las oportunidades identificadas y las mejoras planteadas, para que estas, sean totalmente realizables y coherentes a la realidad de cada activo minero. Para facilitar la toma de decisiones para el futuro de cada Activo Minero

Identificar Oportunidades y desafíos a mediano y largo plazo

Lograr que cada Activo Minero sea propietario y esté comprometido con el plan estratégico LoA.

3.5.1.2 Importancia del Hill of Value en la planificación minera. El Hill of Value (HoV) es una herramienta gráfica y analítica que permite evaluar el valor económico de un proyecto minero en función de diferentes configuraciones estratégicas. Su importancia radica en que ayuda a identificar la combinación óptima de parámetros como el tamaño del pit, tasa de producción, secuencia de minado y ley de corte, permitiendo maximizar el Valor Neto Actual (VAN) del proyecto.

A través del HoV se puede visualizar cómo decisiones estratégicas afectan el valor económico, facilitando la comparación de múltiples escenarios en una etapa temprana de planificación.

3.5.1.3 Relación del HoV con el Valor Neto Actual (VAN). El Hill of Value se construye a partir del cálculo del VAN para cada combinación de variables estratégicas. El VAN representa el valor presente de los flujos de caja futuros del proyecto descontados a una tasa determinada. La relación entre el HoV y el VAN es directa: el punto más alto del HoV representa la combinación de parámetros que genera el mayor VAN, es decir, el máximo valor posible para el proyecto bajo condiciones definidas.

3.5.2 Metodología

3.5.2.1 Optimización y Trade-Offs en diseño de mina. El diseño de mina involucra múltiples decisiones que deben equilibrar factores económicos, técnicos y

ambientales. La optimización consiste en seleccionar aquella configuración que maximiza el VAN. Los "Trade-Offs" implican la evaluación de alternativas: por ejemplo, una mayor tasa de producción puede acortar la vida útil del proyecto, pero aumentar el valor actual de los flujos de caja.

3.5.2.2 Escenario de producción. Se definen distintos escenarios con variaciones en la tasa de producción anual. Cada escenario se analiza para identificar su impacto en el LoA y en los flujos de caja. Las tasas de producción se expresan en toneladas por día o por año, y deben ser compatibles con las capacidades de procesamiento y con los límites ambientales y operativos.

3.5.2.3 Cut-off Grade. La ley de corte es el umbral mínimo de contenido metálico que justifica económicamente la extracción del mineral. Variaciones en la ley de corte afectan directamente la cantidad de material considerado mineral útil, la vida útil del activo, y la secuencia de minado. Escenarios con diferentes cut-offs son evaluados para entender su efecto en el HoV.

3.5.2.4 Construcción del Hill of Value. El HoV se construye evaluando una malla de escenarios generados a partir de la combinación de tasas de producción y leyes de corte. Cada combinación se analiza mediante modelos económicos para calcular el VAN correspondiente. El resultado se representa en una superficie 3D o mapa de calor, donde los ejes X e Y representan los parámetros estratégicos y el eje Z el valor del VAN.

3.5.3 Desarrollo y cálculo del Hill of Value (HoV)

3.5.3.1 Generación de escenarios. Se definen múltiples combinaciones de ley de corte y tasas de producción. Por ejemplo se observa en la tabla 31:

Tabla 31

Escenarios de cut-off y tasas de producción

Cut off	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Value	38,583	40,169	40,386	41,408	41,408	46,469	47,401	48,249	47,647	47,523
Ratio de producción objetivo	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt	380 kt
Años	7	7	7	7	7	6	6	6	6	5
Inventario de mineral	3,016,886	2,993,611	2,985,556	2,985,556	2,985,055	2,697,192	2,677,911	2,649,093	2,585,569	2,344,470
Ley Zn (%)	5.03	5.04	5.05	5.05	5.05	5.37	5.38	5.40	5.43	5.68
Ley Pb (%)	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77	0.74	0.74	0.75	0.76	0.74
Ley Cu (%)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27	0.29	0.30	0.30	0.30	0.32
Ley Au (oz)	1.96	1.97	1.97	1.97	1.97	1.95	1.96	1.97	2.00	1.88
VPT (\$/t)	150	151	151	151	151	157	158	158	160	163
Ley ZnEq (%)	8.32	8.35	8.36	8.36	8.39	8.72	8.75	8.79	8.86	9.05
Medido (%)	8.23	7.92	7.87	7.86	7.86	8.68	8.59	8.65	8.77	9.35
Indicado (%)	10.98	10.67	10.69	10.69	10.69	11.73	11.82	11.78	11.95	12.88
Inferido (%)	65.79	66.30	66.28	66.29	66.29	66.80	66.72	66.79	66.91	64.92
Potencial (%)	15.00	15.12	15.15	15.16	15.16	12.79	12.88	12.77	12.36	12.85
Toneladas minadas - DEV	667,738	661,314	658,688	658,688	658,688	514,405	511,460	508,330	501,773	410,065
Toneladas minadas - OCF	707,333	696,343	694,342	694,035	694,035	693,612	688,925	686,377	676,236	666,345
Toneladas minadas - SARC	1,009,779	1,009,779	1,009,779	1,009,779	1,009,779	1,009,779	1,001,392	982,221	935,397	870,866
Toneladas minadas - SLS	632,036	626,174	622,747	622,747	622,747	479,395	476,134	472,164	472,164	397,194
Total Capex	15,441	15,176	15,034	15,034	15,034	11,627	11,609	11,587	11,545	8,161
Total Opex	26,033	25,791	25,693	25,693	25,693	20,837	20,689	20,549	20,261	16,689

Fuente: Elaboración propia

3.5.3.2 Cálculo del VAN para cada combinación de parámetros. Para cada escenario, se calcula el VAN usando modelos de flujo de caja descontado. Se considera:

- Producción por año
- Costos totales por tonelada
- Ingresos por metal contenido recuperado
- Costos de capital inicial y sostenimiento
- Impuestos

Figura 23

LOM y ZnEq por escenario de cut-off

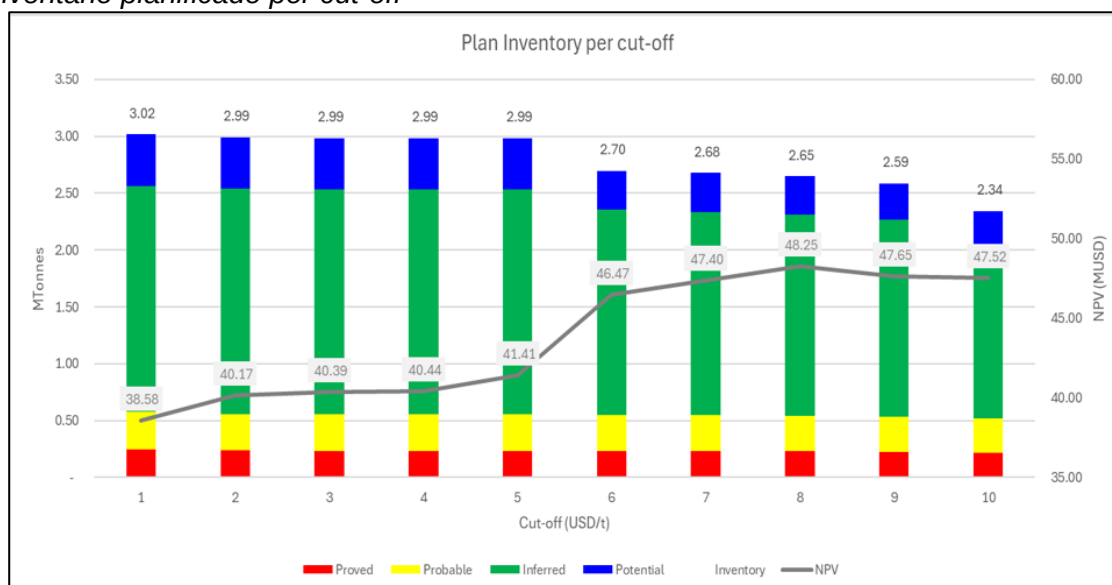


Fuente: Elaboración propia

3.5.3.3 Construcción del Superficie del HoV. Los valores de VAN se representan sobre una superficie 3D. El punto más alto de la superficie (el “pico” del Hill of Value) muestra la mejor combinación de parámetros desde el punto de vista económico.

Figura 24

Inventario planificado por cut-off



Fuente: Elaboración propia

3.5.3.4 Identificación de la configuración óptima. Se identifica el escenario que proporciona el mayor VAN. Esta será la configuración estratégica recomendada para el proyecto, aunque se deben considerar restricciones adicionales como la infraestructura, sostenibilidad y riesgos.

Tabla 32

Identificación de la configuración óptima

	MARGINAL CASE	OPERATING CASE	FULLY CASE
Cut off	1	6	8
Value	38,583	46,469	48,249
Ratio de producción objetivo	380 kt	380 kt	380 kt
Años	7	6	6
Inventario de mineral	3,016,886	2,697,192	2,649,093
Ley Zn (%)	5.03	5.37	5.40
Ley Pb (%)	0.77	0.74	0.75
Ley Cu (%)	0.27	0.29	0.30
Ley Au (oz)	1.96	1.95	1.97
VPT (\$/t)	150	157	158
Ley ZnEq (%)	8.32	8.72	8.79
Medido (%)	8.23	8.68	8.65
Indicado (%)	10.98	11.73	11.78
Inferido (%)	65.79	66.80	66.79
Potencial (%)	15.00	12.79	12.77
Toneladas minadas - DEV	667,738	514,405	508,330
Toneladas minadas - OCF	707,333	693,612	686,377
Toneladas minadas - SARC	1,009,779	1,009,779	982,221
Toneladas minadas - SLS	632,036	479,395	472,164
Total Capex	15,441	11,627	11,587
Total Opex	26,033	20,837	20,549

Fuente: Elaboración propia

3.5.4 Comparación de escenarios con diferentes niveles de riesgo

La comparación de escenarios con distintos niveles de riesgo es una herramienta esencial en la toma de decisiones estratégicas, especialmente en industrias intensivas en capital como la minería, la energía o la infraestructura. Este análisis permite evaluar cómo diferentes condiciones técnicas, económicas o geopolíticas pueden afectar el desempeño y la viabilidad de un proyecto, y orienta la elección de la estrategia más robusta o rentable bajo incertidumbre.

3.5.4.1 Definición de escenarios. Los escenarios se construyen variando ciertos supuestos críticos que afectan el resultado del proyecto. Estos supuestos pueden incluir:

Precio de los metales:

Se establece como costo seleccionado el 2026, debido a la baja confiabilidad de los precios de los metales en la proyección de 2027 en adelante, debido a esto se opta por tener un margen de menor riesgo en la toma de decisiones con respecto a la proyección de los precios de los metales.

Tabla 33

Precio de los metales

PRECIOS	2025	2026	2027	2028	2029	LT PRECIOS	SELECCIONADO
Zn (USD/mt)	2700	2750	2850	2950	2750	2750	2750
Pb (USD/mt)	2150	2175	2200	2225	2150	2150	2150
Cu (USD/mt)	9000	9200	9400	9600	9400	9400	9400
Ag (USD/Oz)	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	26.5	22.26
Au (USD/Oz)	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000

Fuente: Elaboración propia

Ley de mineral y recuperación metalúrgica:

Tabla 34

Ley de mineral y recuperación metalúrgica – Fully case

FULLY CASE	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Toneladas minada	380,049	399,932	400,106	399,980	400,004	400,946
MINING_M: DEV	64,256	165,608	105,887	65,627	82,842	24,110
MINING_M: OCF	262,354	129,116	85,288	88,345	82,457	38,817
MINING_M: SARC	0	86,628	185,350	227,580	182,558	181,334
MINING_M: SLS	53,440	18,579	23,580	18,429	52,147	156,685
Grade Zn (%)	6.27	6.14	6.03	5.27	5.20	4.45
Grade Pb (%)	0.75	0.74	0.74	0.61	0.80	0.75
Grade Cu (%)	0.49	0.21	0.23	0.26	0.27	0.31
Grade Ag (Oz)	1.97	1.44	1.65	1.61	1.99	2.95
VPT (\$/t)	193	164	166	151	160	167
Medido (%)	47	12	1	0	0	0
Indicado (%)	22	19	13	9	9	3
Inferido (%)	31	66	82	83	75	68
Potencial (%)	0	3	4	8	16	29
Total Capex	2,585	2,599	2,599	2,596	1,156	52
Total Opex	4,070	5,645	4,361	3,035	2,682	756

Fuente: Elaboración propia

Costos operativos y de capital:

Tabla 35

Costos operativos

TICLIO – LP	UNIDAD	SLS 2024	OCF 2024	SARC & SLS-C 2025
Preparación	\$/t	19.4	15	9.8
Explotación	\$/t	11.2	31.4	22.2
Planta	\$/t	10.7	10.7	10.7
Marginal Cost (*)	\$/t	41.3	57.1	42.7
Preparación - Explotación (Mina)	\$/t	30.6	46.40	32.0
Servicios (Mina)	\$/t	31.5	31.50	31.5
Mina	\$/t	62.1	77.8	63.5
Planta	\$/t	10.7	10.7	10.7
Indirectos	\$/t	16.4	16.4	16.4
Opex	\$/t	89.2	104.9	90.6
Sustaining	\$/t	20.5	20.5	20.5
Fully Cost	\$/t	109.6	125.4	111.1

Fuente: Elaboración propia

Se establece 10 casos de análisis para efectuar el Hill of value, teniendo como referencia los costos “Marginales”, “Operativo” y “A todo costo”.

- Marginal Case o Caso Marginal, parte de los costos marginales de los tres métodos menos el costo de preparación.
- Operation Case o Caso operativo, parte de los costos operativos de los tres métodos menos el costo de preparación.
- Fully Case o Caso a todo costo, parte de los costos operativos más el Sustaining Capex, menos el costo de preparación.

Tabla 36

Costos de capital

CASO	NOMBRE DEL CASO	SLS	OCF	SARC & SLS-C
1	Marginal Case	21.9	42.1	32.9
2		30.0	50.0	40.0
3		40.0	60.0	50.0
4		50.0	70.0	60.0
5		60.0	80.0	70.0
6	Operating Case	69.8	89.9	80.8
7		80.0	100.0	90.0
8	Fully Case	90.2	110.4	101.3
9		100.0	120.0	110.0
10		110.0	130.0	120.0

Fuente: Elaboración propia

Factores técnicos, geológicos o regulatorios:

Para este análisis se parte un inventario de recursos minerales revisados y validados por el área de estimaciones, con fecha de corte Jun 2024.

Tabla 37

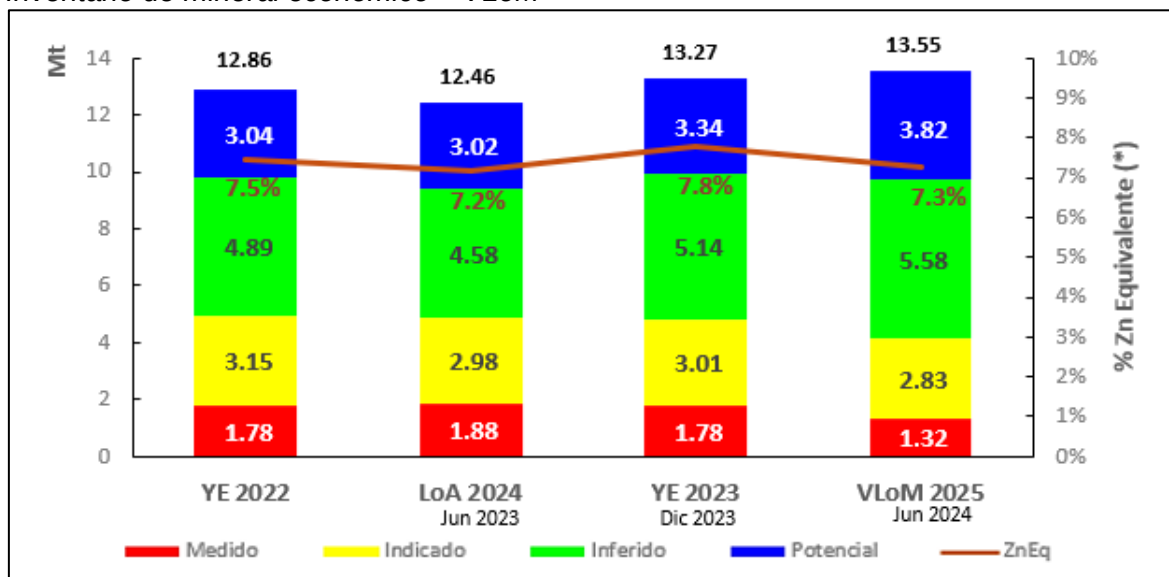
Inventario de mineral económico – VLoM

VLoM 2025	Toneladas (M)	AV (m)	Zn (%)	Pb (%)	Cu (%)	Ag (oz/t)	ZnEq (%)
Medido	1.32	2.38	5.27	1.28	0.20	1.70	9.01
Indicado	2.83	3.94	4.30	0.87	0.19	1.43	7.34
Inferido	5.58	5.99	4.71	1.02	0.23	2.13	8.86
M+I+I	9.73	4.90	4.67	1.01	0.21	1.87	8.63
Potencial	3.82	3.25	2.82	0.87	0.22	1.88	6.38
(M+I+I) + P	13.55	4.44	4.15	0.97	0.21	1.87	8.07

Fuente: Elaboración propia

Figura 25

Inventario de mineral económico – VLoM



Fuente: Elaboración propia

Se cuenta con 9.73 Mton en recurso entre medidos, indicados e inferidos. Las estructuras principales son Veta Ramla Techo y Cuerpo de Reemplazamiento que representa el 90% del inventario económico en análisis.

Condiciones sociales y ambientales:

Para este análisis se establecieron anteriormente restricciones en autorizaciones medioambientales, fin de cesión de usos en concesiones, influencia de la calidad de recurso en el plan y restricciones operativas, las cuales son:

- Autorización de vertimientos Huacracocha y San Nicolas, con riesgo de desaprobación debido a caudales mayores a lo autorizado y falta de permiso ambiental. Autorización y construcción de la PTARI Huacracocha requiere inversión de USD 15M (no viable económicamente).
- Certificación ambiental aprobada hasta Nv.8, operativamente hasta Nv.15. Plan de Cierre inicia en Enero 2026, en proceso de elaboración del permiso ambiental para sustentar la modificación de Plan de Cierre (3er ITS).
- El permiso de la relavera Rumichaca como certificación ambiental vence en octubre del 2025. En proceso de elaboración del 8vo ITS.

- Concesión Argentum /Alpayana (Morococha 1AA) vence en Dic.2024. Se requiere negociar con Alpayana (cesionario) y/o Chinalco (propietario) la autorización del uso de los terrenos superficiales, incluidos los de la bocamina (Tunel Galera).
- El Plan minero del VLoM incluye recursos potenciales que van incrementando de 0% a 37% en los próximos 4 años (incertidumbre geológica).
- Construcción de nuevo sistema de bombeo principal en el Nv.15 para el 2025 (actual drenaje es con bombas sumergibles).

Capítulo IV. Análisis y discusión de resultados

4.1 Análisis de riesgos y toma de decisiones

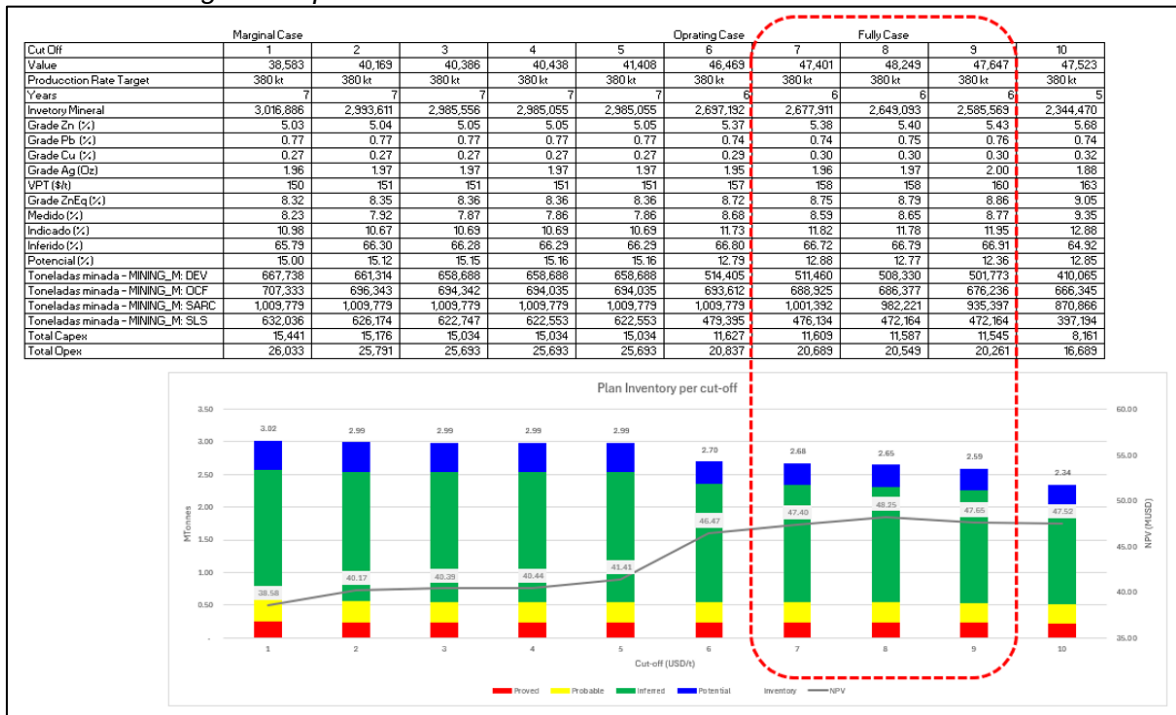
4.1.1 En la planificación

Se establece como hito principal la producción de mina en 380kt en primer año y posterior a ello una producción continua de 400kt por año.

El Hill of value nos establece un rango de tomas de decisión en base al NPV, donde podemos decir que la cumbre del NPV está entre el Caso 7 y 9, o el Caso que envuelve al Caso “A todo costo”.

Figura 26

Análisis de riesgo en la planificación



Fuente: Elaboración propia

En base a los resultados se concluiría que una zonificación de riesgo resultaría en los siguiente.

Tabla 38*Asignación de riesgo por casos*

CASE	NOMBRE DEL CASO	RIESGO	SLS	OCF	SARC & SLS-C
1	Marginal Case	Bajo	21.9	42.1	32.9
2			30.0	50.0	40.0
3			40.0	60.0	50.0
4			50.0	70.0	60.0
5			60.0	80.0	70.0
6	Operating Case		69.8	89.9	80.8
7		Medio	80.0	100.0	90.0
8	Fully Case		90.2	110.4	101.3
9			100.0	120.0	110.0
10		Alto	110.0	130.0	120.0

Fuente: Elaboración propia

4.1.2 En la operación

Tiendo en cuenta las restricciones fuertes de la toma de decisiones en la planificación, nos quedaría analizar el en volante del Fully Case o Caso “A todo costo”

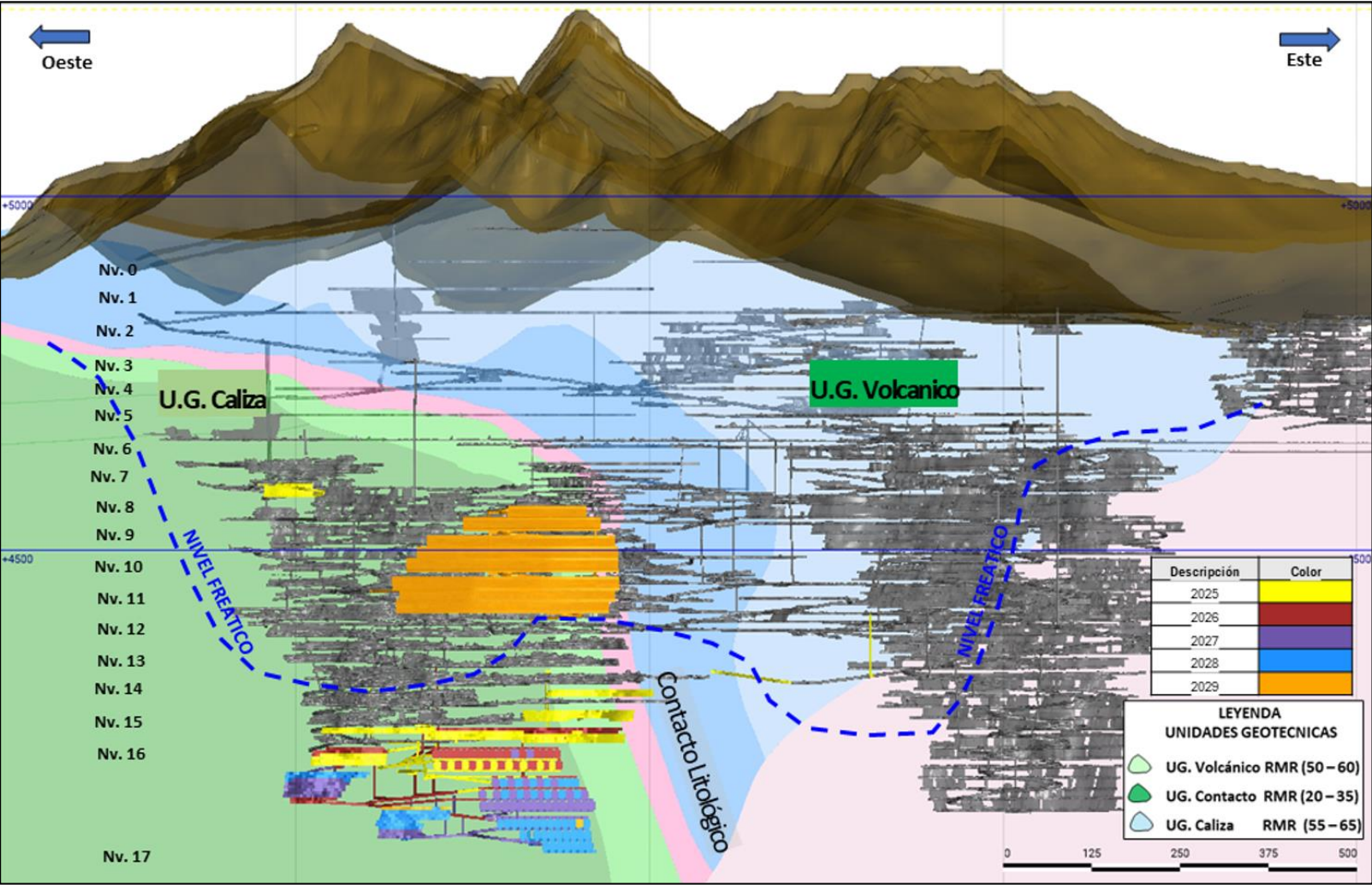
En tal caso nos comente analizar los riesgos a niveles operativos del plan.

4.1.2.1 Modelo geomecánico.

- Análisis de estabilidad conceptual 2D veta Ramal Techo (2024).
- La despresurización del nivel freático en la profundización se realizará mediante taladros y labores de drenaje.
- Se implementará el monitoreo sísmico para el minado y profundización.
- En las zonas de reemplazamiento y minado en SARC se considera el monitoreo en línea con extensómetros para medir las deformaciones.
- Se construirá un modelo de bloques geomecánico 3D con el respaldo de 7,511 m de logeo geomecánico, 387 ensayos y mapeo de labores.

Figura 27

Modelo geomecánico



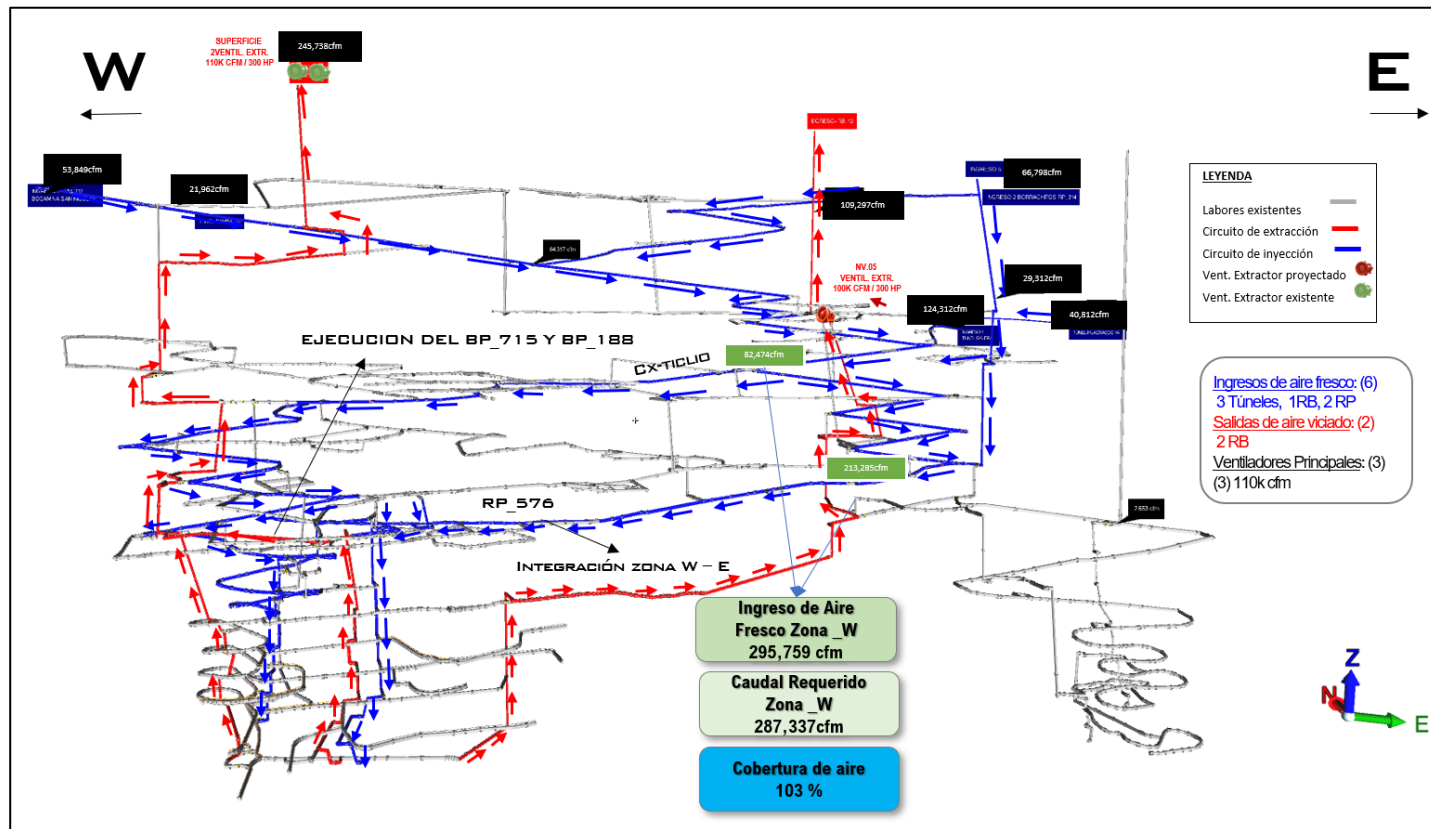
Fuente: Cía. Minera Volcan

4.1.2.2 Modelo de Ventilación

- Se cuenta con tres circuitos de extracción de aire viciado.
- Dentro de la profundización de la zona oeste se planea administrar aire fresco con dos troncales

Figura 28

Modelo de ventilación



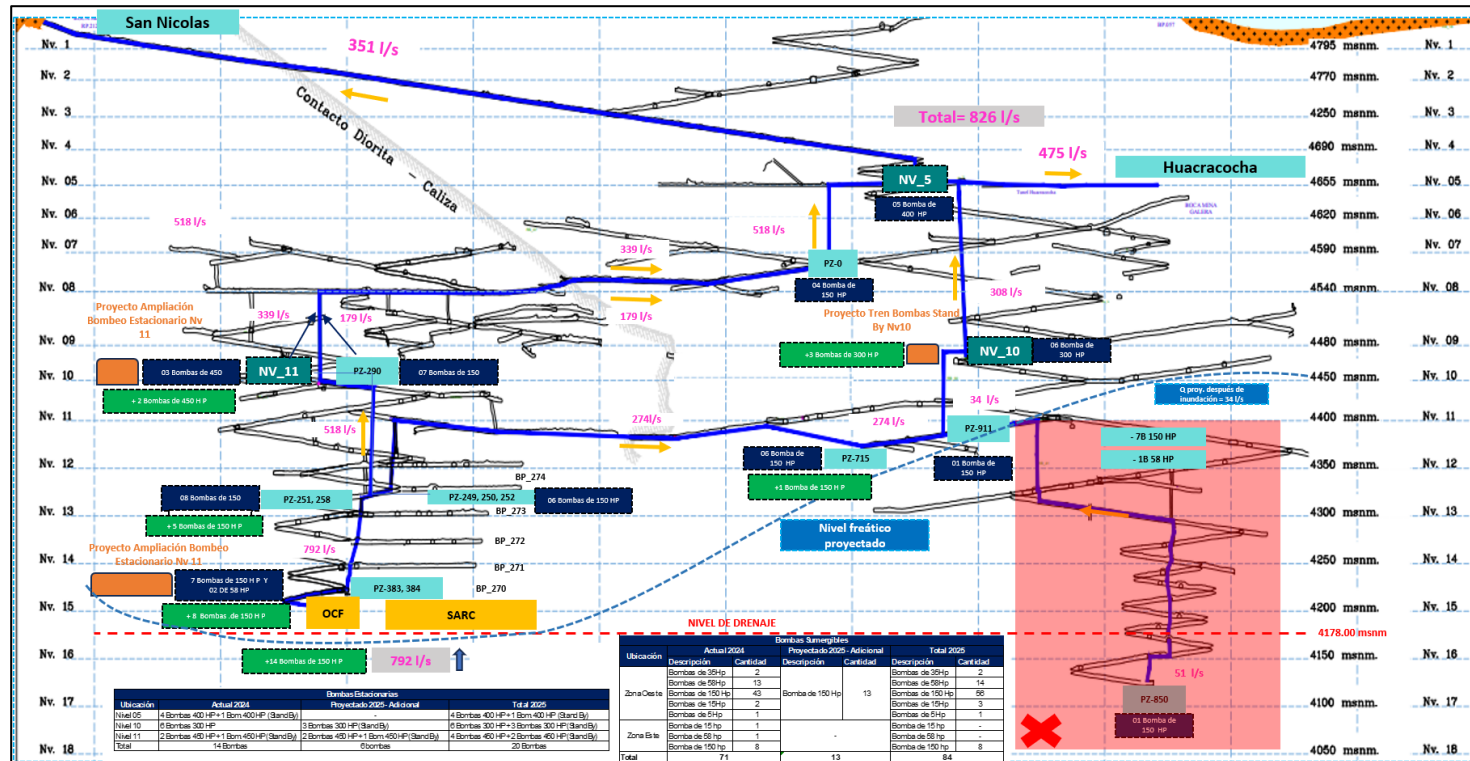
Fuente: Cía. Minera Volcan

4.1.2.3 Modelo de Sistema de Bombeo

- Actualmente se tienen un sistema bombeo capaz de despresurizar un 644l/s, la cual es insuficiente para las proyecciones de caudales en interior mina para los escenarios Caso7, Caso8 y Caso9, que son de 850l/s en el 2025 y 1000l/s en lo posterior.
- Se presenta la proyección de caudales y plan de despresurización para una caudal de 820 l/s.

Figura 29

Modelo de sistema de bombeo



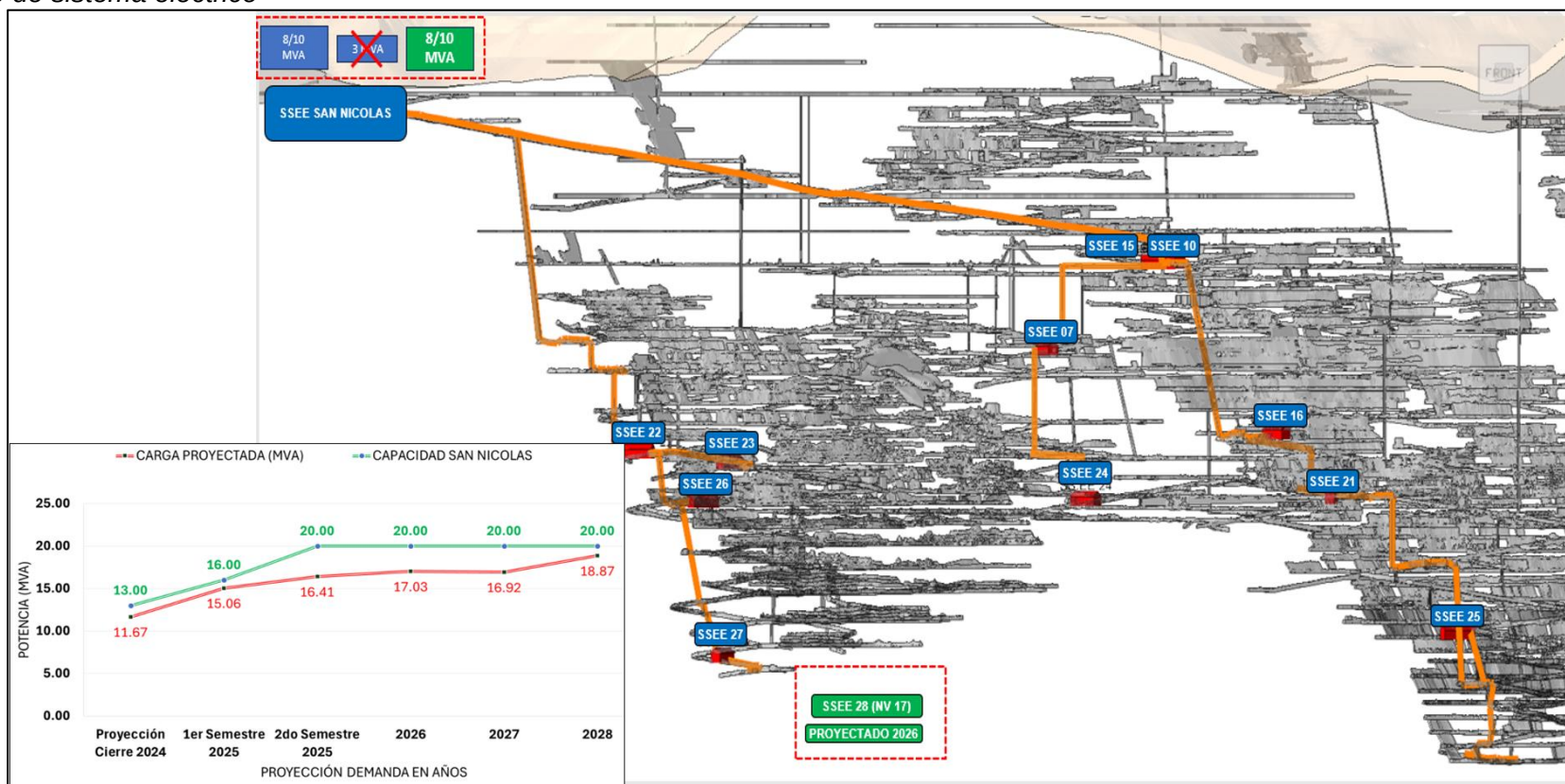
Fuente: Cía. Minera Volcan

4.1.2.4 Modelo de Sistema eléctrico

- Actualmente la carga proyectada de potencia es de 11.67 MVA, la cual se proyectará para el 2025 y adelante en: 16.41 MVA y 17.03 MVA y 17.03 MVA respectivamente.

Figura 30

Modelo de sistema eléctrico



Fuente: Cía. Minera Volcan

4.1.3 Legales y de permisos

- Autorización de vertimientos Huacracocha y San Nicolas, con riesgo de desaprobación debido a caudales mayores a lo autorizado y falta de permiso ambiental. Autorización y construcción de la PTARI Huacracocha requiere inversión de USD 15M (no viable económicamente).
- Certificación ambiental aprobada hasta Nv.8, operativamente hasta Nv.15. Plan de Cierre inicia en Enero 2026, en proceso de elaboración del permiso ambiental para sustentar la modificación de Plan de Cierre (3er ITS).
- El permiso de la relavera Rumichaca como certificación ambiental vence en octubre del 2025. En proceso de elaboración del 8vo ITS.
- Concesión Argentum /Alpayana (Morococha 1AA) vence en Dic.2024. Se requiere negociar con Alpayana (cesionario) y/o Chinalco (propietario) la autorización del uso de los terrenos superficiales, incluidos los de la bocamina (Túnel Galera).
- El Plan minero del VLoM incluye recursos potenciales que van incrementando de 0% a 37% en los próximos 4 años (incertidumbre geológica).
- Construcción de nuevo sistema de bombeo principal en el Nv.15 para el 2025 (actual drenaje es con bombas sumergibles).

4.2 Calculo del riesgo del proyecto

Se aplica la siguiente matriz para calcular el riesgo del proyecto.

Figura 31

Matriz de riesgos

		Probabilidad				
		Raro 1	Improbable 2	Posible 3	Probable 4	Casi seguro 5
Riesgo	5. Catastrófico	15	19	22	24	25
	4. Mayor	10	14	18	21	23
	3. Moderado	6	9	13	17	20
	2. Menor	3	5	8	12	16
	1. Insignificante	1	2	4	7	11

Fuente: Elaboración propia

$$\text{Riesgo del proyecto} = \sqrt{\frac{\sum(X^2)}{N}} \quad (7)$$

$$\text{Probabilidad del proyecto} = \frac{\sum(Y)}{N} \quad (8)$$

Se analizará el nivel de riesgo de 3 planes, de acuerdo a los análisis anteriores (caso 7, 8 y 9).

Tabla 39

Matriz de riesgos – caso 7

	Principales riesgos operativos	Riesgo Materializado	Velocidad del Riesgo	Riesgo	Probabilidad	Valoración
1	Imposibilidad o retraso en la obtención de Permisos y Autorizaciones		Mediano Plazo	5	5	25
2	Vencimiento de Concesión Morococha 1AA	X	Corto Plazo	3	4	17
3	Deficiente operatividad en la Infraestructura Minera (Energía)	X	Corto Plazo	2	4	12
4	Incapacidad de mantener la vida útil de la mina e incumplimiento de producción debido a la falta de reservas minerales.		Mediano Plazo	3	3	13
5	HoV - Bajo Riesgo		Largo Plazo	3	3	13
6	Años de vida del activo		Mediano Plazo	3	3	13
7	Proyecto CAPEX LOM		Mediano Plazo	4	2	14
Nivel de riesgo promedio				3	2	13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40

Matriz de riesgos – caso 8 (Fully case)

	Principales riesgos operativos	Riesgo Materializado	Velocidad del Riesgo	Riesgo	Probabilidad	Valoración
1	Imposibilidad o retraso en la obtención de Permisos y Autorizaciones		Mediano Plazo	5	5	25
2	Vencimiento de Concesión Morococha 1AA	X	Corto Plazo	3	4	17
3	Deficiente operatividad en la Infraestructura Minera (Energía)	X	Corto Plazo	2	4	12
4	Incapacidad de mantener la vida útil de la mina e incumplimiento de producción debido a la falta de reservas minerales.		Mediano Plazo	3	3	13
5	HoV - Bajo Riesgo		Largo Plazo	3	3	13
6	Años de vida del activo		Mediano Plazo	3	3	13
7	Proyecto CAPEX LOM		Mediano Plazo	4	2	14
Nivel de riesgo promedio				3	3	13

Fuente: Elaboración propia

Tabla 41*Matriz de riesgos – caso 9*

	Principales riesgos operativos	Riesgo Materializado	Velocidad del Riesgo	Riesgo	Probabilidad	Valoración
1	Imposibilidad o retraso en la obtención de Permisos y Autorizaciones		Mediano Plazo	5	5	25
2	Vencimiento de Concesión Morococha 1AA	X	Corto Plazo	3	4	17
3	Deficiente operatividad en la Infraestructura Minera (Energía)	X	Corto Plazo	2	5	16
4	Incapacidad de mantener la vida útil de la mina e incumplimiento de producción debido a la falta de reservas minerales.		Mediano Plazo	3	4	17
5	HoV – Riesgo Medio		Largo Plazo	3	3	13
6	Años de vida del activo		Mediano Plazo	3	4	17
7	Proyecto CAPEX LOM		Mediano Plazo	4	3	18
Nivel de riesgo promedio				4	3	17

Fuente: Elaboración propia

4.3 Validación de hipótesis

En esta sección empezamos planteando la hipótesis nula y alternativa.

- H_0 : El análisis estratégico del riesgo en la planificación minera no permite optimizar el uso de recursos críticos, extender la vida útil del activo y generar oportunidades de desarrollo sostenible.
- H_A : El análisis estratégico del riesgo en la planificación minera permite optimizar el uso de recursos críticos, extender la vida útil del activo y generar oportunidades de desarrollo sostenible.

Para poder realizar la prueba de hipótesis, debido a que la variable es el nivel de riesgo asociado a los casos analizados, se usara la información de las tablas mostradas en la sección anterior, donde se analizó el nivel de riesgo de los casos 7, 8 y 9, que eran los casos que estaban en el Hill of Value.

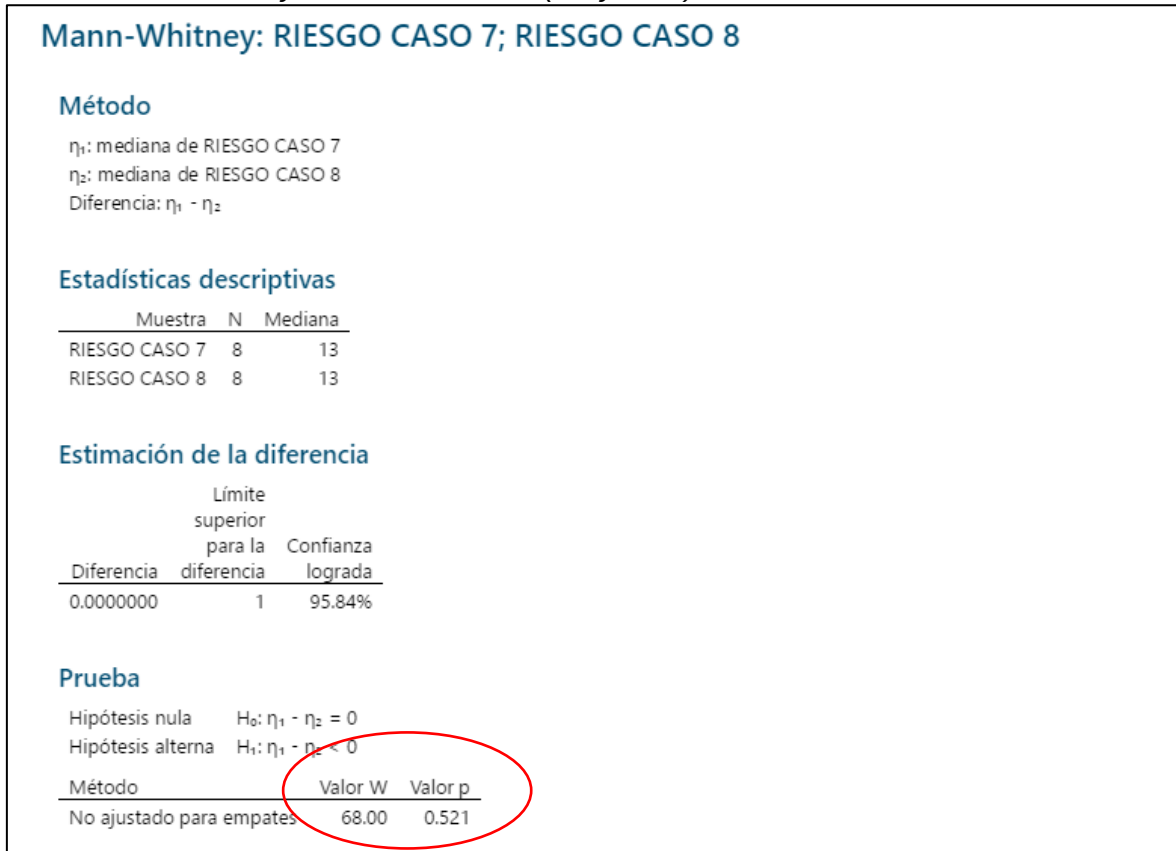
Al ser los datos independientes entre sí, se opta por realizar una prueba para datos no paramétricos, en este caso se usó la prueba de Mann-Whitney que sería el equivalente a la prueba t-student en datos paramétricos.

Se realizó dos pruebas: Caso 7 vs Caso 8 (Fully case) y Caso 8 (Fully case) vs Caso 9, en ambas parejas el número de muestras es de $n = 8$, y se considera un nivel de confianza de 95%.

Tenemos:

Figura 32

Prueba Mann-Whitney Caso 7 vs Caso 8 (Fully case)

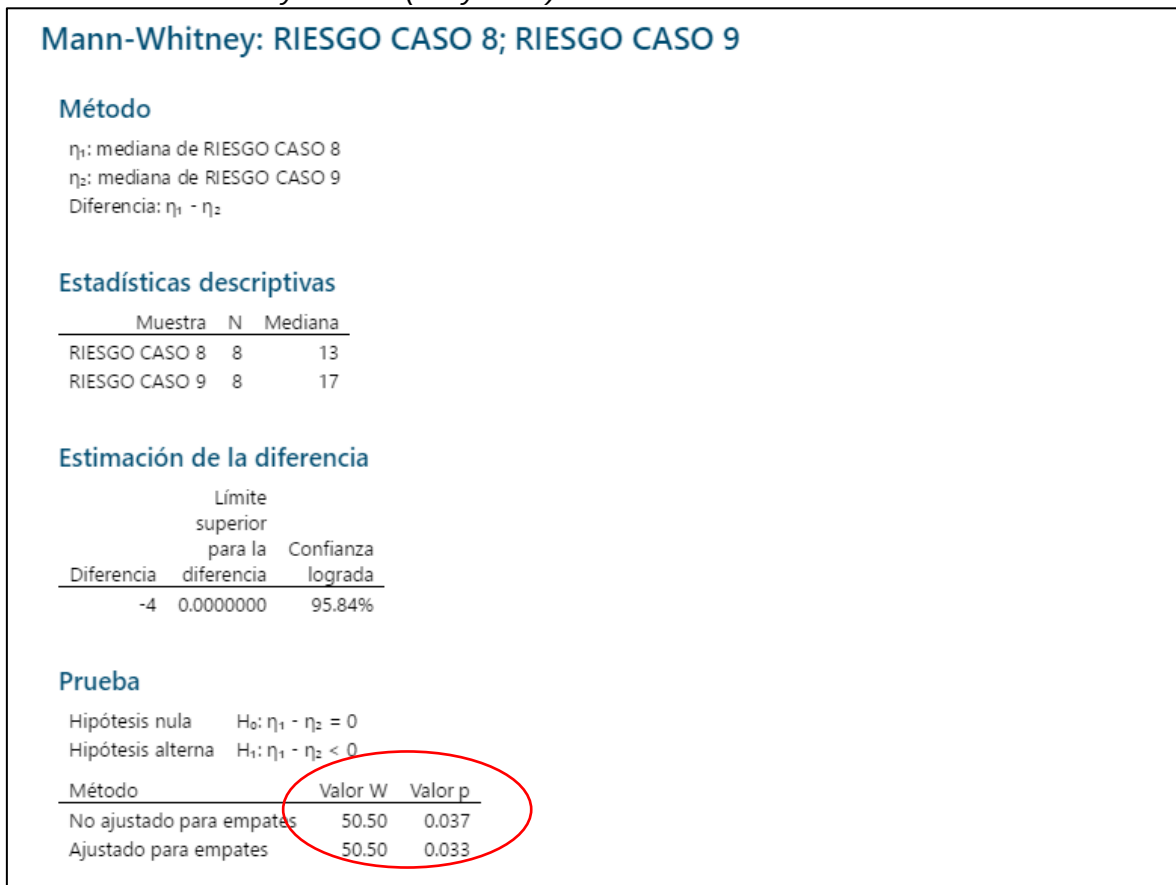


Fuente: Elaboración propia

En este caso se observa un valor de p mayor a 0.05, esto se debe a que ambos casos presentan un mismo nivel de riesgo, pero se elige el caso 8 porque en el análisis económico presento mayor VPN.

Figura 33

Prueba Mann-Whitney Caso 8 (Fully case) vs Caso 9



Fuente: Elaboración propia

En este caso el valor de p es menor a 0.05, debido a que el nivel de riesgo del caso 8 es menor al del caso 9, por lo que se puede concluir que “El análisis estratégico del riesgo en la planificación minera permite optimizar el uso de recursos críticos, extender la vida útil del activo y generar oportunidades de desarrollo sostenible”.

En base al análisis de riesgo se obtiene la siguiente matriz de riesgo:

Figura 34

Matriz de riesgos – resumen de casos

	Probabilidad				
	Raro	Improbable	Posible	Probable	Casi seguro
	1	2	3	4	5
5. Catastrófico	15	19	22	24	25
4. Mayor	10	14	18	21	23
3. Moderado	6	9	Caso 7 y 8 13	Caso 9 17	20
2. Menor	3	5	8	12	16
1. Insignificante	1	2	4	7	11

Fuente: Elaboración propia

Se determina el mejor escenario Caso 8 (Fully Cost) debido a que presenta un VPN de 48.25 MUSD, (+0.85MUSD, por encima del Caso 7).

Conclusiones

De la figura 25, la integración del análisis estratégico del riesgo en la planificación minera permite extender la vida útil del activo y generar oportunidades de desarrollo sostenible. Esto se evidencia en el incremento del inventario mineral del VLOM 2025, que alcanza 1.2 Mt adicionales respecto al LoA 2024, gracias a la incorporación de recursos inferidos viables económicamente, especialmente en la zona de C. Reemplazamiento. A pesar de no contar con una cuantificación precisa del riesgo, este crecimiento refleja el valor de una planificación con visión estratégica.

El enfoque en escenarios de riesgo controlado ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la resiliencia del proyecto. La planificación considera un 70 % de recursos inferidos con viabilidad económica, lo que implica un nivel de riesgo geológico muy alto, pero con sustento técnico basado en información operativa y modelamiento actualizado. Este enfoque permite responder ante la incertidumbre con alternativas operativas, como la migración del método de minado de OCF a SARC.

Las metodologías aplicadas para gestionar el riesgo, como el rediseño del método de explotación, los alineamientos de diseño y restricciones operativas, así como el diseño anticipado de infraestructura de bombeo (NV 15), han contribuido a mantener la viabilidad económica del plan, incluso ante riesgos hidrogeológicos, operativos y legales.

La planificación estratégica que incorpora el riesgo facilita la optimización de recursos críticos. El 93 % del inventario supera el costo operativo base (99 USD/t), y el 62 % se sitúa por encima del cut-off integral (136 USD/t), lo que demuestra una adecuada priorización de zonas con valor económico positivo. Incluso el 2 % del material con bajo valor (29 USD/t) se justifica operativamente al estar asociado a obras de preparación clave para el método SARC.

De la figura 34, la aplicación de un enfoque estratégico del riesgo permitió identificar oportunidades ocultas en zonas de mayor incertidumbre, al tiempo que se diseñaron mecanismos para mitigar riesgos relevantes en aspectos operativos, legales y

ambientales. El análisis comparativo entre escenarios permitió seleccionar el Caso 8 (Fully Cost) como el más favorable, con un VPN de 48.25 MUSD, el más alto entre las alternativas evaluadas.

Recomendaciones

Se recomienda implementar una estrategia formal de gestión de riesgos que incluya análisis probabilísticos, matrices de criticidad y modelamiento de escenarios (optimista, base y pesimista), especialmente para riesgos operativos (flujo de agua, sostenimiento) y económicos (variación de precios y costos). Esto permitirá una toma de decisiones más resiliente frente a la incertidumbre.

A pesar de que el Caso 8 (Fully Cost) presenta el mayor VPN (48.25 MUSD), se sugiere actualizar los análisis financieros conforme se reduzca la incertidumbre de los recursos inferidos y evolucionen las condiciones de mercado, para validar que dicho caso continúe siendo el óptimo.

El incremento de inventario a partir de decisiones de planificación con mayor riesgo asumido (como el uso de inferidos y cambio de método) representa una oportunidad para aplicar este enfoque estratégico en otras zonas o proyectos similares, siempre bajo un marco de evaluación técnica rigurosa.

Referencias bibliográficas

- Camus, J. (2002). *Management of Mineral Resources: Creating Value in the Mining Business*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME).
- Dimitrakopoulos, R. (2011). *Strategic mine planning under uncertainty: Incorporating stochastic optimization techniques*. Mining Technology, 120(2), 80–88.
- Dimitrakopoulos, R., & Ramazan, S. (2004). *Uncertainty-based production scheduling in open pit mining*. SME Transactions, 316, 106–112.
- Duzgun, H. S., & Einstein, H. H. (2004). *Assessment and management of risk in underground mining*. SME Transactions, 316, 69–76.
- Hernández, J., & García, M. (2023). *Incorporación de la evaluación de riesgos ESG en la planificación estratégica minera para una visión integral del activo*. Revista de la Ingeniería Minera y Metalúrgica, 32(4), 18-29.
- Hinde, D. (2017). *Financial Modeling and Valuation for Mining Projects: A Case Study Approach*. Elsevier.
- ICMM. (2009). *Good Practice Guidance on Health Impact Assessment*. International Council on Mining and Metals.
- ICMM. (2015). *Good practice guide: Risk-based approaches to mine closure*. International Council on Mining and Metals. <https://www.icmm.com>
- Kemp, D., Bond, C. J., Franks, D. M., & Cote, C. (2010). *Mining, water and human rights: Making the connection*. Journal of Cleaner Production, 18(15), 1553–1562.
- Knights, P., & Hadjigeorge, J. (2017). *Risk management in mining*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 117(1), 1-8.
- Leite, A., & Dimitrakopoulos, R. (2007). *Stochastic optimization model for open pit mine planning: Application and risk analysis at a copper deposit*. Mining Technology, 116(3),
- Little, R. A. (2019). *Strategic Mine Planning*. SME.
- Pérez, A. (2020). *Impacto de la volatilidad del precio del cobre en la planificación de la*

producción de una mina a gran escala en el Perú.

- Ramazan, S., & Dimitrakopoulos, R. (2013). *Stochastic optimization of long-term production scheduling for open pit mines with uncertain geology*. Journal of the Operational Research Society, 64(4), 543–553.
- Rodríguez, S. (2016). *Evaluación del riesgo social en la planificación de proyectos mineros y su impacto en la obtención de la licencia social en el Perú*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.
- Runge, I. C. (2013). *Mining Economics and Strategy*. Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME)
- Shaw, R., & Dimitrakopoulos, R. (2019). *Mine planning under geological uncertainty with stochastic optimization*. Journal of Mining Science, 55(5), 758–770.
- Silva, C., & Sánchez, A. (2015). *Risk analysis in mine planning using Monte Carlo simulation*. Journal of Mining and Metallurgy, Section A: Mining, 51(3), 231–240.
- Society of Mining, Metallurgy & Exploration (SME). (2018). *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed.). SME.
- Sun, Z., Chen, Y., & Zhang, W. (2024). *Risk-based production scheduling optimization for underground mines considering rock mass quality and operational constraints*. International Journal of Mining Science and Technology, 34(1), 1-10.
- Vidal, A., & Bravo, F. (2023). *Desafíos en la gestión de la incertidumbre en los planes de cierre de minas y su impacto en la vida útil del activo*. Revista Latinoamericana de Minería, 15(1), 77-90.
- World Economic Forum. (2017). *Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry*.
- World Economic Forum. (2025). *The Global Risks Report 2025 (20th Edition)*.
- International Council on Mining and Metals (ICMM). (2025). *ICMM releases updated guidance to strengthen approaches to the closure of tailings storage facilities*.